

به نام خدا

## پروتکل I<sup>2</sup>C

نویسندگان :

### سید مجتبی شاکری – محسن قلعه نوئی

#### کلمات کلیدی

I<sup>2</sup>C ، میکروکنترلر، همزمان سازی، SCL ، SDA ، Baud rate ، Handshaking ، DCE ، DTE ، Master ، Slave ، OSI ، Wired- ، Hub ، SERVO ، RS-232 ، Acknowledge ، Arbitration ، current-source ، open-drain ، open-collector ، AND ، LED ، Multiplexer ، GPIO ، Extender ، Repeater

#### چکیده

در دنیای صنعتی امروز ، انتقال دیتا به عنوان یکی از مهمترین بخشهای پروسه های کنترلی شناخته شده است و طراحان در تلاش برای بوجود آمدن پروتکل های جدیدی با ایمنی ، صحت و سرعت بالا در انتقال دیتا هستند. در این مقاله ، در ابتدا به معرفی تبادل دیتا (Data Communication) پرداخته و برخی از مباحث کلیدی آن از جمله ارتباط سریال و موازی ، فزستنده و گیرنده ، اتصالات و تبادل شفاف ، ساختار Master-Slave ، سرعت انتقال ، مدوله سازی ، Handshaking را مختصراً توضیح می دهیم. سپس به قسمت اصلی مقاله ، معرفی پروتکل I<sup>2</sup>C می پردازیم . این پروتکل توسط شرکت فیلیپس در دهه ۱۹۸۰ جهت ارتباط دستگاههای TV با پردازشگر ابداع شده است. که بدلیل سادگی و سرعت مناسب آن مورد توجه دیگر سازندگان قطعات الکترونیک قرار گرفت و هم اکنون به عنوان یکی از پروتکل های کاربردی در صنعت شناخته شده است. در این مقاله به جزئیات فنی این پروتکل و کاربردهای آن در بخشهای مختلف پرداخته ایم.



## چگونه تبادل دیتا انجام می پذیرد؟

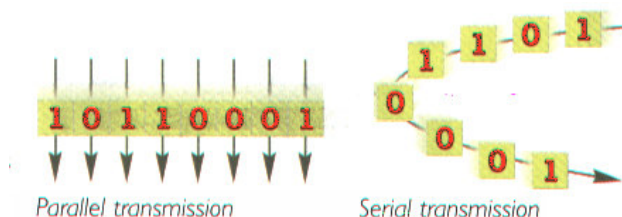
هدف از تبادل دیتا ، انتقال دیت بین ۲ یا تعداد بیشتری واحد می باشد. به عنوان یک اصل ، آنها می توانند کاراکتر، دستورات باشند که نیاز به نمایش دارند. ساده ترین سطح زبان کامپیوتر ، کاراکترهای باینری است که شامل ۷ یا ۸ ، عدد صفر یا یک می باشد. اکثر کامپیوترها با این سطح کار می کنند.

## تبادل دیتا اساساً با صفر و یک صورت می گیرد.

یکی از استانداردهای معمول در کامپیوترها ، استاندارد ASCII می باشد که شامل ۱۲۸ کاراکتر است که هر کدام از آنها از ۷ بیت تشکیل شده است. باید توجه داشت که ارتباطات در داخل کامپیوتر با سرعت زیادی انجام می شود و برای ارتباط با محیط خارج باید ارتباطات همزمان شوند و همچنین باید صحت تبادل دیتا ، کنترل شود. استانداردهای مختلفی از ASCII وجود دارد. به عنوان مثال Extended ASCII که از هشتمین بیت نیز برای انتقال data استفاده می کند.

## یک بیت در هر زمان یا یک بایت بطور کامل

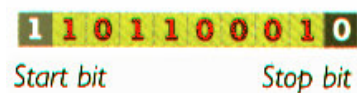
دو روش برای انتقال دیتا وجود دارد :



۱- سریال

۲- موازی

در انتقال موازی ، برای هر بیت یک مسیر در نظر گرفته شده است. بنابراین کاراکترها می توانند بطور همزمان ارسال شوند. با توجه به این مزیت، که سرعت بالای انتقال است این روش در سیستمهای ارتباطی کوتاه مورد استفاده قرار می گیرد. در مقابل ، در روش سریال هر بیت در هر لحظه فرستاده می شود. بنابراین پروتکل ارتباطی ، باید بتواند برای مقصد ، ابتدا و انتها را مشخص کند. علاوه بر این، سرعت انتقال نیز با واحد bit/s معرفی می شود.



## یک کاراکتر در یک زمان یا یک جمله کامل

ما دو روش برای انتقال سریال داریم :

۱- انتقال غیر همزمان (Asynchronous)

۲- انتقال همزمان (synchronous)

در انتقال غیر همزمان ، ترانسمیتر، کاراکترها را در یک لحظه با بیت start و stop می فرستد. و گیرنده هر بیت start را که دریافت می کند، بقیه بیتها را به عنوان کاراکتر تفسیر می کند. و بیت stop گیرنده را ریست می کند. در حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد از انتقال نوع سریال data بصورت غیر همزمان است.

در انتقال همزمان همه پیام ها در یک لحظه فرستاده می شود. سرعت انتقال توسط خط clock بر روی یک سیم جداگانه یا بصورت مدوله شده بر روی سیگنال دیتا ، تعیین می شود. عیب روش غیر همزمان در مقابل روش همزمان این است که حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد پیغام شامل بیتهای پرتی می باشد.



*In asynchronous transmission, one byte is transmitted at a time. The byte starts with a start bit and ends with a stop bit.*



*In synchronous transmission, the whole set of data is transmitted at once, in a continuous stream.*

## فرستنده و گیرنده

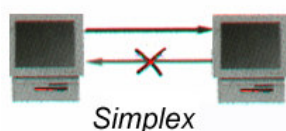
در مبحث تبادل دیتا ، سخت افزارهایی با نام فرستنده و گیرنده وجود دارد. مانند PC و ربات که می توانند هم به عنوان گیرنده و هم به صورت فرستنده در یک زمان عمل کنند.

این انتقال به سه روش می تواند انجام شود:

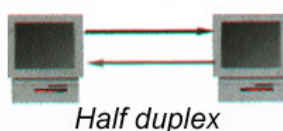
۱- simplex : انتقال دیتا تنها یک طرفه است و از جانب فرستنده به گیرنده ، روی یک line می باشد.

۲- Half duplex : انتقال دیتا ، به صورت دو طرفه می باشد ولی نه بصورت همزمان بلکه روی دو line جداگانه انجام می پذیرد.

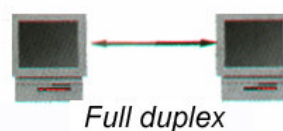
۳- Full duplex : انتقال دیتا ، به صورت دو طرفه ، همزمان روی یک line انجام می پذیرد.(مانند انتقال دیتا در مکالمات تلفنی)



Simplex



Half duplex



Full duplex

## اتصال صحیح :

DTE(data terminal equipment) و DCE(data communication equipment) از جمله اصطلاحاتی است که در تبادل دیتا وجود دارد. کامپیوترها و ترمینالها معمولاً DTE هستند، مودم و سخت افزارهای ارتباطی معمولاً DCE هستند در حالی که تجهیزات دیگری نظیر مولتی پلکسرها و پرینترها می توانند هم DTE و هم DCE باشند. در DTE پهنای استفاده شده برای انتقال و دریافت دیتا متفاوت با پهنای کانکتور DCE می باشند. بدین ترتیب می توان DTE را مستقیماً به DCE متصل کرد. در صورتی که دو DCE را به هم متصل کنیم مجبوریم که فرمت اتصال را تغییر دهیم تا خط TD(Transmit Data) بر خط RD(receive data) منطبق شود.



## تبادل شفاف (transparent communication)

در سیستمهای کامپیوتری که بوسیله تعدادی مودم با هم شبکه شده اند از ارتباط شفاف استفاده می کند. شفافیت به معنای این است که همه واحدها همه پیغامها را می شنوند.

## ساختار Master-Slave

بخش گسترده ای از شبکه های صنعتی از این ساختار استفاده می کنند بدین صورت که چندین Master پیغام ها را بطور متناوب به Slave هایی که پاسخ می دهند می فرستد. این توالی را polling می نامند. در این سیستم هر Slave آدرس مخصوص به خود را دارد.

Master فرمان خود را به همراه آدرس Slave مورد نظر می فرستد. Slave مورد نظر پس از تشخیص آدرس ، فرمان را انجام داده و در بعضی مواقع سنگنال تاییدی برای master می فرستد تا به کار خود ادامه دهد.

ساختار و شکل آدرس و پیغام بستگی به نوع پروتکل ارتباطی که استفاده می شود، دارد. پیغامی که برای همه slave ها فرستاده می شود پیغام broadcast نامیده می شود. این می تواند پیغامی باشد که توسط master به تمامی slave ها دستور داده می شود که آن وظیفه را انجام می دهند. به عنوان مثال می توان plc های کنترل کننده آژیر را نام برد. در هنگام خطر همه آژیرها باید به صدا درآیند بنابراین یک پیغام broadcast باید فرستاده شود.

## سرعت انتقال:

همواره بهینه ترین سرعت ، بیشترین سرعت نیست بلکه باید خطای انتقال و ارتباطات را نیز در نظر گرفت. نوع کابل و فاصله سرعت بهینه را تعیین می کند. در این صورت ما به امنیت بالا و قابل اطمینان در انتقال دیتا دست می یابیم .

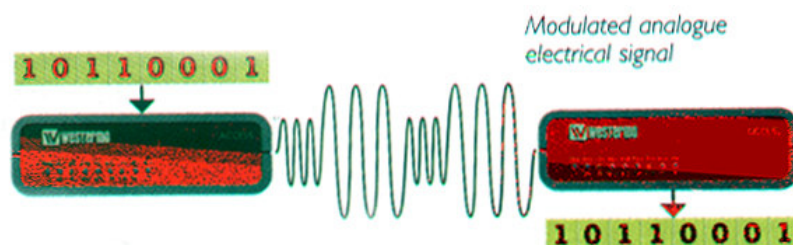
برای انتقال دیتا دیجیتال به وسیله سیم های مسی باید در ابتدا تغییر شکل پیدا کند.

کابل ارتباطی سبب تضعیف و متغیر شدن سیگنال می شوند که در سرعت های بالا این اثرها می تواند بحرانی باشند.

دو اصطلاح که در این مبحث وجود دارد bit/s و baud rate می باشند. سرعت انتقال با bit/s اندازه گیری می شود. بطور تقریبی برای انتقال هر کاراکتر ۱۰ بیت نیاز است بنابراین می تواند با سرعت 9600 bit/s تقریباً ۹۶۰ کاراکتر را در ثانیه انتقال داد.

برای تغییر شکل سیگنال پیش از فرستادن به شبکه از مودم استفاده می شود. مودم ، سیگنال و baud rate را تغییر می دهد.

Baud rate تعیین می کند سیگنال در هر ثانیه چند بار تغییر شکل پیدا می کند (مدوله می شود). هر تغییر شکل در سیگنال در واقع ایجاد بسته ای است که در طول خط به سوی مودم گیرنده فرستاده می شود و در آنجا کدگشایی شده و دوبار اطلاعات به دیجیتال تبدیل می شود.



در مودم های short-haul (برای مسیرهای کوتاه) سیگنال تغییر شکل پیدا نمی کند و همان چیزی که فرستاده می شود در مودم گیرنده دریافت می شود و به صورت Transparent ارتباط برقرار می کنند.

مودم های PTT مانند مودم های short-haul عمل می کنند با این تفاوت که بافری دارند که دیتا را قبل از فرستادن ذخیره می کند. با توجه به baud rate میزان سرعت انتقال دیتا مشخص می شود به عنوان مثال اگر مودم بتواند با 1400 baud کار کند و در هر انتقال ۴ بیت داشته باشیم باید سرعت انتقال 9600 bit/s باشد.

## مدوله سازی :

سیگنالهای دیتا باید برای انتقال دیتا در انواع کابلها ، تغییر شکل پیدا کرده و سازگار شوند. سطح های دیجیتال برای کابل انتخابی مورد نظر به فرمی قابل خواندن تغییر داده شود.

سه نوع مدوله سازی وجود دارد:

۱- مدوله سازی فرکانس:

فرکانسهای مختلفی برای انتقال سطوح دیجیتال ۰ و ۱ استفاده می شود .

۲- مدوله سازی فاز:

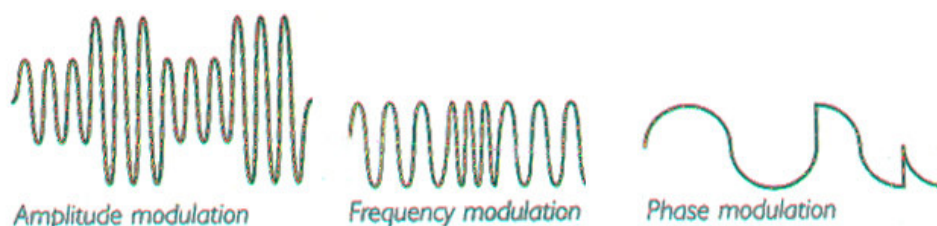
برای انتقال سطوح دیجیتال ۰ و ۱ از شیفت فازی ناگهانی سیگنال سینوسی حامل استفاده می کند. این روش معمول در مودمهای PTT در شبکه های ارتباطی راه دور استفاده می شود.

۳- مدوله سازی دامنه :

از قدرت و دامنه سیگنال ارسالی برای نشان دادن سطح ۱ و ۰ استفاده می کند.

۴- مدوله سازی دامنه و فاز:

ترکیبی است که اجازه انتقال بیت های بیشتری در هر baud را میدهد.



## Handshaking

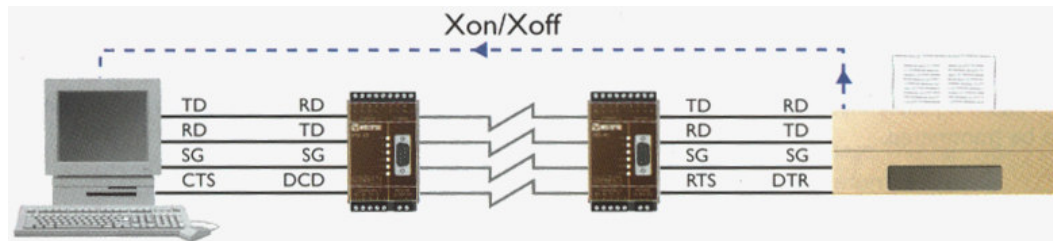
Handshaking روشی برای تجهیزات ارتباط دیتا است تا بتوانند جریان دیتا بین دستگاه هایی که به شبکه متصل هستند را کنترل کنند. به خصوص در مواردی که یکی از دستگاه ها نسبت به بقیه کندتر باشند. دینوع Handshaking وجود دارد: نرم افزاری و سخت افزاری .

زمانی را در نظر بگیرید که بین کامپیوتر و پرینتر ارتباط برقرار کرده اید . حال اگر بخواهید اطلاعات را با سرعت بیشتری از آنچه پرینتر چاپ میکند، بفرستید. دستگاه پرینتر این قابلیت را دارد که اطلاعات اضافی را در یک بافر ذخیره کند. در اینجا هنگامی که بافر پر می شود با Handshaking نرم افزاری یا سخت افزاری ، کامپیوتر را از این مساله آگاه کرد.

مثال دیگر در استفاده از مودم می باشد . سرعت دیتا بین کامپیوتر و مودم معمولاً بیشتر از آن است که خطوط تلفن پشتیبانی می کند بنابراین مودم باید از این روش استفاده کند تا به کامپیوتر اطلاع دهد با سرعت کمتری دیتا را انتقال دهد.

## Handshaking نرم افزاری :

در مثال پرینتر با این روش وقتی بافر پر می شود کاراکتری را برای کامپیوتر ارسال میکند (Xoff). وقتی که بافر خالی شد کاراکتری برای کامپیوتر ارسال می شود (Xon) تا انتقال دیتا ادامه پیدا کند. کاراکترهای معمولی که در این پروتکل استفاده می شوند شماره ۱۷ اسکی (Xon) و شماره ۱۹ اسکی (Xoff) می باشد.

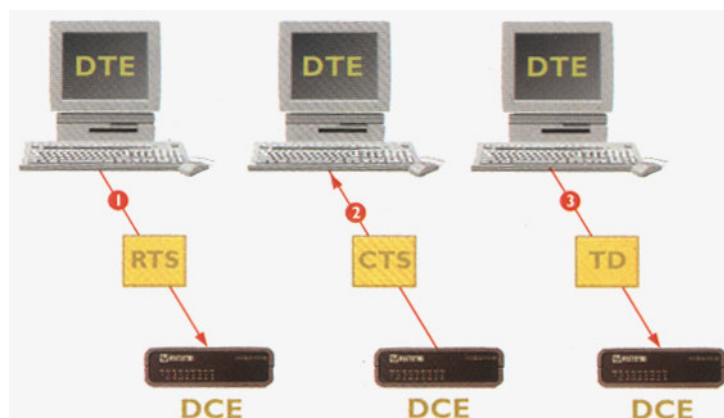


## Handshaking سخت افزاری:

به جای استفاده از کارکترهای اضافی در جریان دیتا، پروتکل RS-232 خطوط سخت افزاری اضافی بدین منظور در نظر گرفته است. رایج ترین خطوط استفاده شده (RTS (Request to send و CTS (Clear to Send می باشند. به عنوان نمونه وقتی که کامپیوتر می خواهد با یک مودم ارتباط برقرار کند:

- ۱- اگر کامپیوتر بخواهد دیتا را انتقال دهد خط RTS را از ۳ به ۱۵ افزایش می دهد. (دیتا انتقال نیافته است)
  - ۲- مودم تغییر در خط RTS را تشخیص داده و هنگامی که آماده دریافت دیتا است خط CTS را تغییر می دهد.
  - ۳- کامپیوتر منتظر میماند که اگر خط CTS به سطح بالا تغییر کرد دیتا را انتقال دهد.
- در هر نقطه ای که خط CTS افت کند کامپیوتر انتقال دیتا را متوقف می کند.
- خط سخت افزاری که غالباً برای پرینترهای سریال فوری استفاده می شود خط DTR است که به کامپیوتر اطلاع می دهد انتقال دیتا را به دلیل نبودن کاغذ متوقف کند.

سیگنالهای سخت افزاری تنها برای روش Handshaking استفاده نمی شوند بلکه کاربردهای دیگری نیز می توانند داشته باشند. هنگامی که دو قطعه از یک دستگاه به طور ویژه ای ترکیب شده و سوئیچ خط انجام می پذیرد برای اطمینان از اینکه هر قطعه سیگنال صحیح را در زمان صحیح دریافت کرده استفاده از این روش کارگشا می باشد.

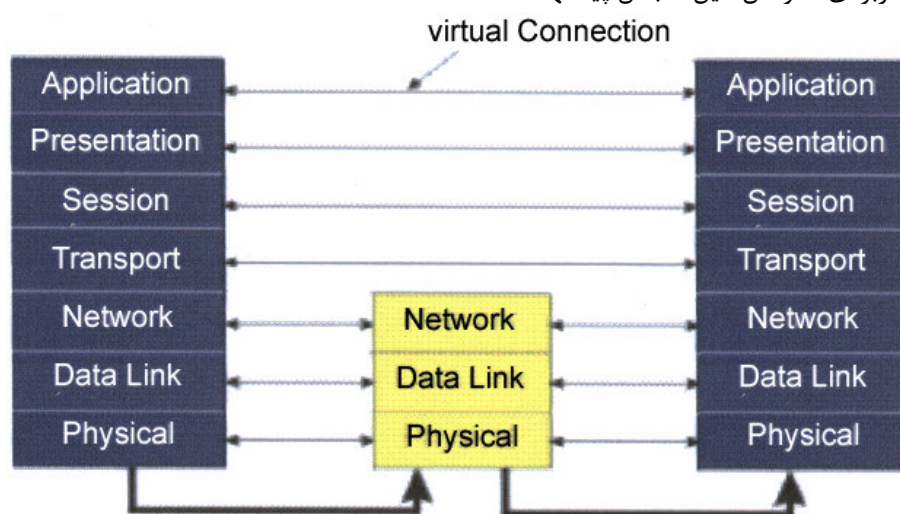




## مدل سیستمهای باز open systems model

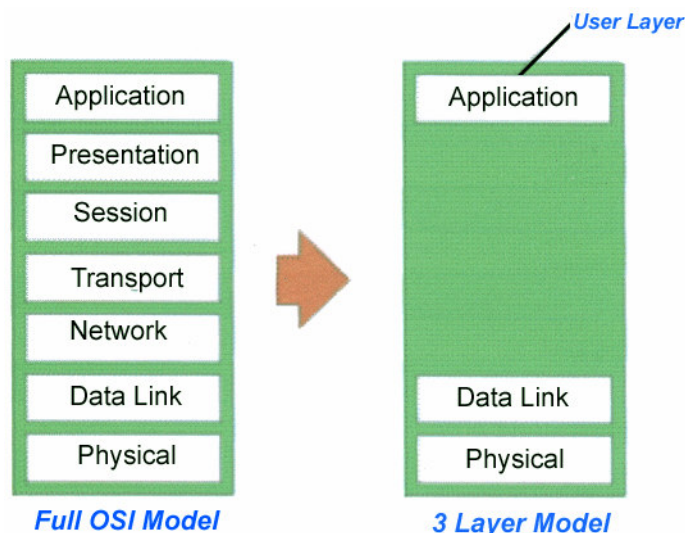
در تبادل دیتای دیجیتال ، سیم بندی بین دو یا چند وسیله یکی از اولین گامها در برپایی یک شبکه است. همانند این تجهیزات سخت افزاری ، نرم افزار نیز باید آدرس دهی شود. مدل مرجع OSI شامل هفت لایه زیر می باشد:

- لایه ۱ (لایه فیزیکی): تعریف الکتریکی و مکانیکی سیستم
- لایه ۲ (لایه پیوند دیتا (data link): قالب بندی و قالب تصحیح خطای دیتا
- لایه ۳ (لایه شبکه): فرستادن بهینه پیغامها از یک شبکه به شبکه دیگر
- لایه ۴ (لایه ارسال): کانالی برای ارسال پیغامها از یک فرآیند کاربردی به دیگری
- لایه ۵ (لایه دیدار (Session layer): سازمان دهی و همزمان سازی تبادل دیتا
- لایه ۶ (لایه ارائه (Presentation): قالب دیتا و یا دوباره ارائه دادن
- لایه ۷ (لایه کاربردی): ارسال فایل ، تبادل پیغامها



مدل OSI به صورت مجموعه ای از وجودهایی همانند یک برنامه نرم افزاری که در هر یک از هفت لایه قرار داده شده اند قابل تصویر است. این یک قالب کاری کلی را برای تولیدکننده فراهم می آورد که راه حلهای ارتباطی خود که شامل لینکهای ارتباطی سخت افزاری و پروتکلهاست را به صورت بسته (package) درآورد.

در دنیای ابزار دقیق ، این مدل OSI به صورت زیر ساده می گردد:



- لایه ۱ : لایه فیزیکی
- لایه ۲ : لایه پیوند دیتا
- لایه ۳ : لایه کاربردی

این عمل به صورت ارزشمندی عملکرد یک سیستم کلی را ساده می کند. شما توجه خواهید داشت که یک لایه دیگر در بالای دیگر لایه ها به آن اشاره شده که لایه کاربر (User layer) نامیده شده است.



این لایه یک بخش از مدل OSI نیست ولی بخش مهمی از یک سیستم کلی است.

مثالهایی از چگونگی کاربرد این لایه ها عبارتند از:

- RS-232 و RS-485 مثالهایی از لایه فیزیکی هستند.
- پروتکل Modbus مثالی از لایه پیوند دیتاست.
- Ethernet شامل لایه های فیزیکی و پیوند دیتاست.
- پروتکل ابزار دقیق هوشمند HART شامل هر سه لایه فیزیکی ، پیوند دیتا و کاربردی است.
- Profibus و Foundation Profibus شامل هر سه لایه فوق است.

## تاریخچه I<sup>2</sup>C :

پروتکل I<sup>2</sup>C در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسط شرکت Philips ابداع گردید که هدف ابتدایی آن فراهم کردن راهی ساده جهت ارتباط یک CPU با تراشه های جانبی در یک دستگاه تلویزیون بود زیرا باسهای سابق و موجود دارای تعداد خطوط زیاد بود که سبب ازدحام در PCB مربوطه می گردید.

I<sup>2</sup>C طبق تعریف شرکت فیلیپس مخفف Inter-IC می باشد که بیانگر هدف آن یعنی فراهم آوردن یک لینک ارتباطی بین مدارات مجتمع می باشد.

امروزه این پروتکل به صورت عمومی در صنعت پذیرفته شده است و کاربرد آن از سطح تجهیزات صوتی و تصویری نیز فراتر رفته است. به گونه ای که امروزه در بیش از ۱۰۰۰ نوع IC مختلف به کار گرفته شده است .

## مزایای باس برای طراح :

پروتکل I<sup>2</sup>C سبب سهولت و سرعت در طراحی مدارات می گردد زیرا :

- ۱- بلوک دیگرام عملیاتی کاملاً با IC های واقعی مطابقت دارد و طراح به سرعت می تواند به شماتیک نهایی دست پیدا کند.
  - ۲- نیاز به طراحی رابط (interface) اضافی ندارد زیرا به صورت on-chip وجود دارد و محاسبات مربوط به تطبیق امپدانس و ... حذف می گردد .
  - ۳- هم از لحاظ نرم افزاری و هم سخت افزاری قابل کنترل می باشد .
  - ۴- IC های مربوطه به راحتی قابل اضافه کردن و یا کم کردن می باشند.
  - ۵- زمان طراحی نرم افزاری به دلیل وجود کتابخانه های آماده کاهش می یابد.
- همچنین با توجه به تکنولوژی ساخت آنها وسیله های سازگار با I<sup>2</sup>C دارای ویژگیهای زیر می باشد:

- ۱- مصرف بی نهایت کم جریان
- ۲- امنیت در برابر نویز بسیار خوب
- ۳- محدوده ولتاژ تغذیه گسترده :
- ۲٫۵ تا ۵ ولت یا ۲٫۷ تا ۵٫۵ ولت و در وسایل جدید ۲٫۳ تا ۵٫۵ ولت یا ۳ تا ۳٫۶ ولت
- ۴- رنج گرمایی کاری گسترده :
- از ۴۰- تا ۸۵ درجه سانتیگراد و در بعضی موارد ۰ تا ۷۰ درجه و یا ۰ تا ۱۲۰ درجه

## مزایای باس I<sup>2</sup>C برای تولید کنندگان :

این باس دارای مزایای زیر برای تولید کنندگان می باشد .

- دو سیمه بودن آن سبب سادگی و کوچک شدن PCB ها شد.
- حذف decoder های آدرس
- قابلیت ارائه در بسته های (Package) ریز و مناسب موجود می باشد.

## سخت افزار باس I<sup>2</sup>C

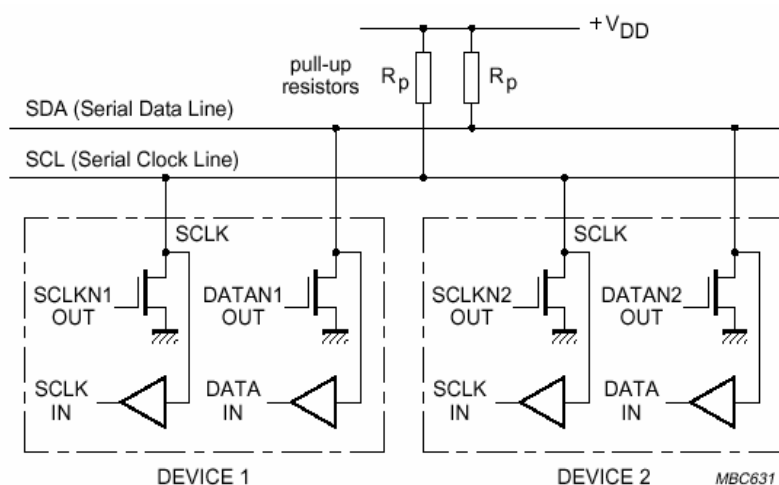
این باس به طور فیزیکی شامل دو خط فعال می باشد:

- خط داده سریال (SDA) serial data line

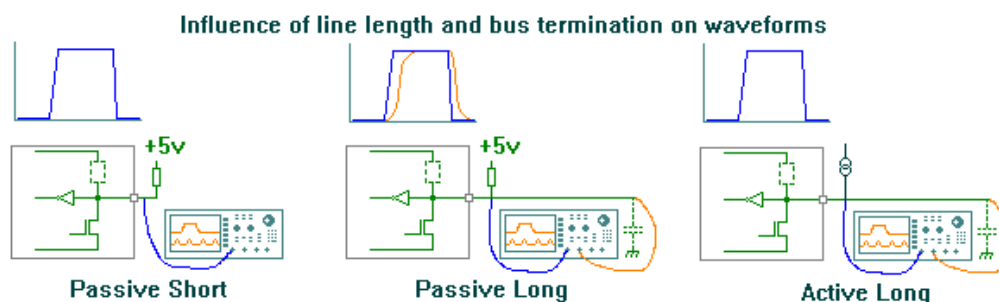
- خط پالس ساعت سریال (SCL) serial clock line

این خطوط هر دو به صورت دو جهته عمل می کنند به همین دلیل می توان چند خدمات رسان Master داشت یا اینکه هر وسیله به عنوان فرستنده یا گیرنده عمل کند.

در ساخت این وسایل از تکنیک open-collector استفاده شده است. در این صورت هرگاه چند خروجی به یک سطح متصل شوند نتیجه آن سطح AND شده این چند خروجی خواهد بود. همچنین در این باس خطوط SDA و SCL از طریق مقاومتهای pull-up و یا منابع جریان به یک منبع ولتاژ مثبت متصل هستند که نتیجه آن نگه داشتن خط در سطح HIGH است.



هر چند تکنیک ارائه شده در مورد open-collector بودن و مقاومتهای pull-up دارای مزیت wired-and می باشد ولی این موضوع در مورد خطوط طولانی که دارای یک ظرفیت خازنی می باشند ایجاد یک ثابت زمانی RC می گردد که برای رفع این موضوع به جای مقاومت از منابع جریان می توان استفاده کرد.



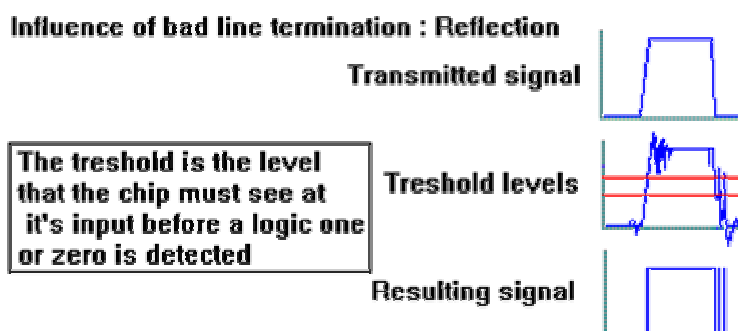
با توجه به تکنیکهای به کار گرفته شده و با توجه به امپدانس موجود در خط که باید محدود به 400pf گردد. این نوع باس در سه سرعت زیر قادر به جابجایی داده ها می باشد:

۱- حالت Standard-mode : تا حداکثر 100kbit/s

۲- حالت Fast-mode : تا حداکثر 400kbit/s

### ۳- حالت High Speed-mode(HS-mode): تا حداکثر 3.4Mbit/s

همان طور که دیده می شود در حالاتی سرعت انتقال داده ها به قدری بالا می رود که ممکن است اثرات نا مطلوبی بر روی سیگنال ارسالی داشته باشد از جمله سوار شدن نویزهای سوزنی بر روی سیگنال که می تواند با توجه به منطق موجود ما را دچار مشکلات سازد.



برای رفع این مشکل در ابزارهایی که با سرعت بالا عمل می کنند از فیلترهای ویژه ای استفاده شده است. همان طور که اشاره شد هر وسیله باید در این پروتکل به صورت منحصر بفرد آدرس دهی گردد که قسمتی از آدرس آن به صورت داخلی در IC موجود می باشد و قسمت دیگر آن توسط پینهای آدرس که بر روی این ICها در نظر گرفته شده تعیین می گردد.

فرضاً در ICهایی که بصورت ۷ بیتی آدرس دهی می شوند معمولاً سه پایه (A0,A1,A2) موجود می باشد که اجازه می دهد  $2^3 = 8$  IC قابل شناسایی از یک مدل در این باس وجود داشته باشد.

### فرمت انتقال داده ها:

هر بایت داده بر روی خط SDA باید ۸ بیت طول داشته باشد. و همچنین هیچ محدودیتی در مورد تعداد بایتهای ارسالی توسط یک فرستنده بر روی SDA وجود ندارد.

باید توجه داشت که در هنگام انتقال داده ها زمانی که clock در سطح high است نباید خط SDA تغییر کند مگر در دو حالت که نشان دهنده حالت شروع و پایان می باشد.

بیت START : تغییر سطح منطقی SDA از high به low زمانی که clock در سطح high قرار دارد.

بیت STOP : تغییر سطح منطقی SDA از low به high زمانی که clock در سطح high قرار دارد.

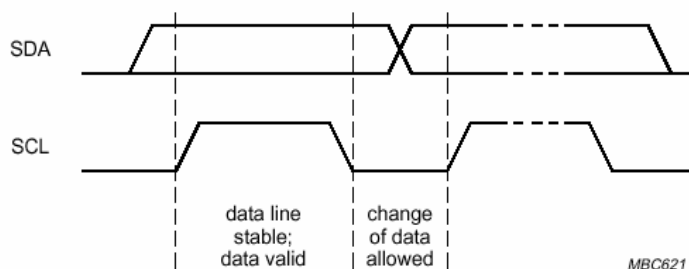


fig.4 Bit transfer on the I<sup>2</sup>C-bus.

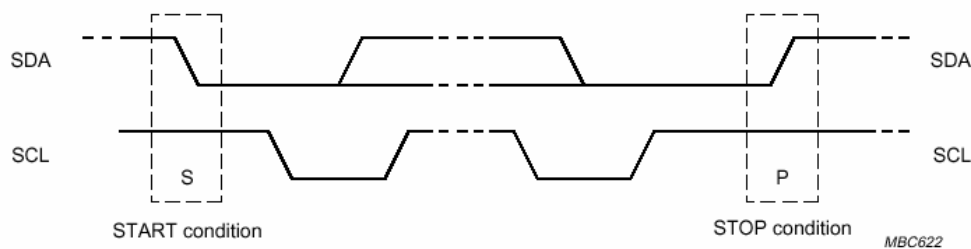


Fig.5 START and STOP conditions.

بعد از هر بایت ارسال شده جهت تعیین اینکه این بایت توسط گیرنده پذیرش شده است یا نه یک بیت دیگر در پالس بعدی ارسال می گردد که به Acknowledge bit معروف است. اگر در این بیت SDA در سطح high قرار بگیرد به این معنی است که پذیرش صورت نگرفته است و اگر SDA به سطح low برود به این معنی است که پذیرش صورت گرفته است.

### مساله همزمان سازی پالس ساعت :

پالس ساعت توسط Master ها تولید می گردد. هر Master پالس ساعت خود را بر روی SCL قرار می دهد و با توجه به خاصیت wired-AND در این گونه باس پالس ساعت ها با هم AND شده و باعث تولید یک پالس ساعت مشترک می گردد.

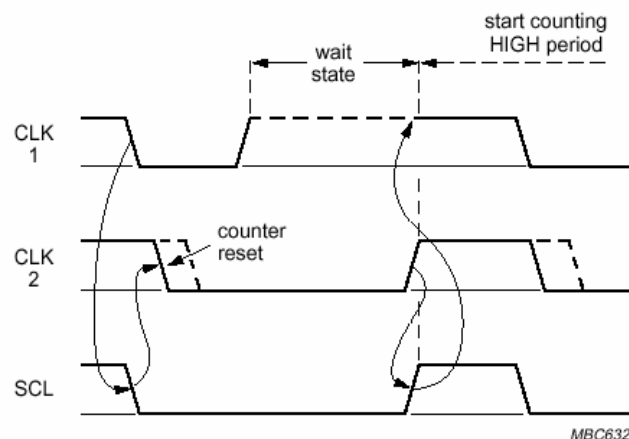


Fig.8 Clock synchronization during the arbitration procedure.

### مساله داوری و حاکمیت یک Master :

هر Master تنها در زمانی می تواند به باس دسترسی پیدا کند که خط SDA آزاد باشد. در اینجا نیز وجود خاصیت wired-AND باعث حل مشکل می گردد یعنی چند Master بطور همزمان داده هایشان را بر روی خط SDA به صورت سریال ارسال می دارند و با هم AND شده و بر روی باس یک دیتای واحد قرار می گیرد در اولین مکانی که خط SDA با خط داده مربوط به یک Master مطابقت نداشت آن Master خط داده سریال را در سطح یک منطقی رها می کند (حالت پیش فرض با توجه به وجود pull-up سطح high می باشد) تا بر روی کار دیگر Master ها تاثیر نداشته باشد.

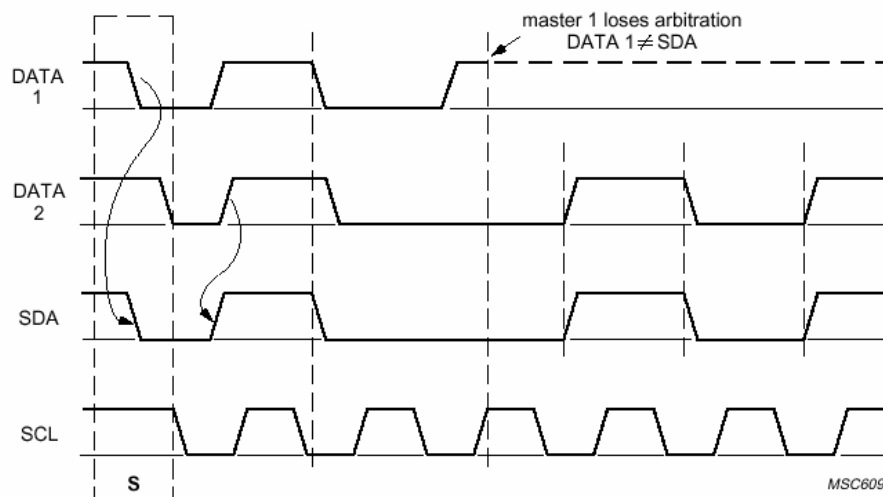


Fig.9 Arbitration procedure of two masters.

همان طور که دیده می شود مساله Arbitration تنها در مورد حالتی معنی دارد که چند Master داشته باشیم زیرا

۱- در مورد Slave ها با توجه به اینکه در هر زمان یک Slave آدرس دهی می شود و حق دسترسی به SDA را دارد معنی نخواهد داشت.

۲- یک Master دیگر رقیبی برای دسترسی به خط SDA ندارد.

همچنین باید توجه داشت که در موارد زیر Arbitration بکار گرفته نمی شود :

- بین وضعیت repeated Start (Sr) و بیت دیتا
- بین وضعیت Stop و بیت دیتا
- بین یک وضعیت repeated Start (Sr) و وضعیت Stop

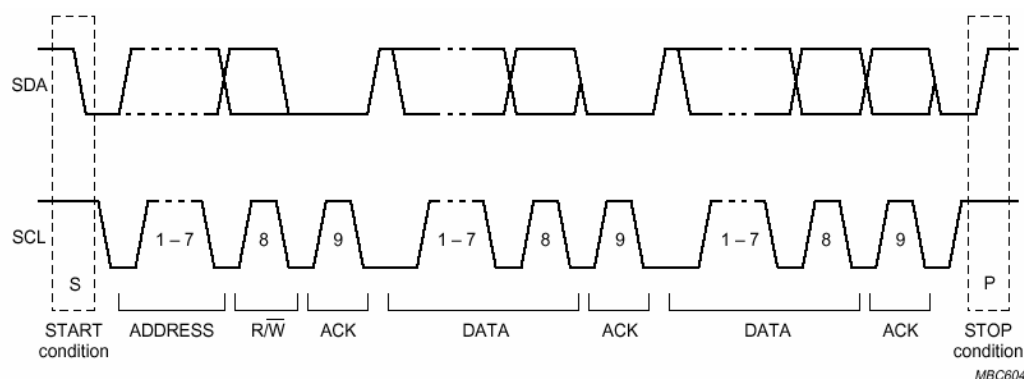


## آدرس دهی :

برای شناسایی هر وسیله در این پروتکل نیاز به یک آدرس داریم که در مورد هر وسیله تعدادی از بیت‌های آن به صورت on-chip آدرس دهی می‌شود و مابقی از طریق پین‌های آدرس سخت افزاری مشخص می‌گردد. در ابتدا آدرسی که به هر وسیله اختصاص می‌یافت یک آدرس ۷ بیتی بود ولی با گسترش این باس و تعداد وسیله‌های بکار رفته در آن نیاز به آدرس دهی با تعداد بیت بالاتر احساس شد و آدرس دهی به صورت ۱۰ بیتی بوجود آمد.

## آدرس دهی ۷ بیتی:

در این حالت بعد از وضعیت START(S)، آدرس یک slave فرستاده می‌شود که ۷ بیت طول دارد. سپس در بیت ۸ جهت انتقال داده ( $R/\bar{W}$ ) مشخص می‌گردد. صفر بیانگر فرستادن داده (WRITE) و یک بیانگر درخواست دیتا (READ) می‌باشد. هر ارسال داده نیز با یک وضعیت STOP خاتمه می‌یابد. اگر master همچنان نیاز به دسترسی به باس داشته باشد از یک وضعیت شروع مجدد Repeated Start (Sr) استفاده می‌کند و سپس یک slave دیگر را آدرس دهی می‌کند، بدون اینکه ابتدا نیاز به وضعیت STOP داشته باشد.



g.10 A complete data transfer.

با توجه به این نوع آدرس دهی سه حالت زیر موجود می‌باشد:

- ۱- یک master-transmitter داده هایش را به یک slave-receiver بدون اینکه جهت ارسال تغییر کند، منتقل می‌کند.

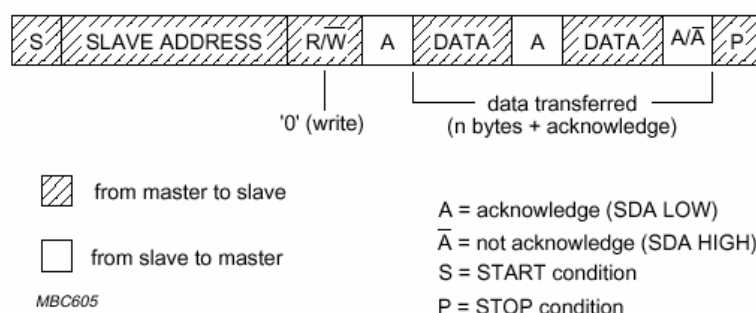


Fig.11 A master-transmitter addressing a slave receiver with a 7-bit address.  
The transfer direction is not changed.

۲- یک master داده ها را بلافاصله بعد از اولین بایت از slave می خواند.

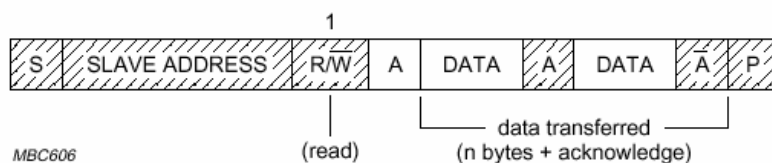


Fig.12 A master reads a slave immediately after the first byte.

۳- حالت ترکیبی: ترکیبی از دو حالت قبل است یعنی جهت ارسال قابل تغییر است.

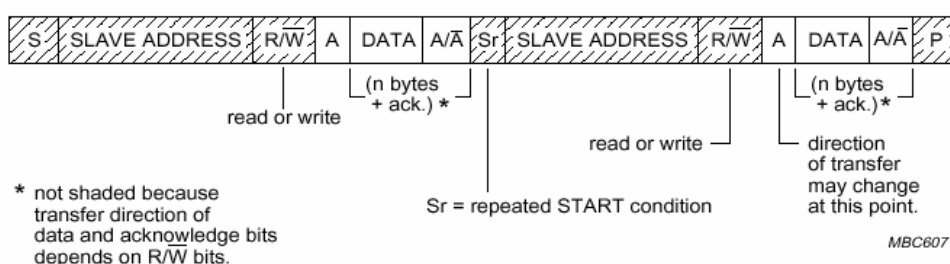


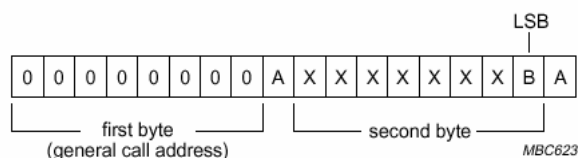
Fig.13 Combined format.

اما باید توجه داشت که در بایت اول تعدادی از آدرسها برای مقاصد خاصی دحیره سده اند که در جدول زیر به آنها اشاره می گردد:

Definition of bits in the first byte

SLAVE ADDRESS	R/W BIT	DESCRIPTION
0000 000	0	General call address
0000 000	1	START byte
0000 001	X	CBUS address
0000 010	X	Reserved for different bus format
0000 011	X	Reserved for future purposes
0000 1XX	X	Hs-mode master code
1111 1XX	X	Reserved for future purposes
1111 0XX	X	10-bit slave addressing

General call: برای این است که پس از شروع کار باس و ارسال این بایت تمام وسیله ها آدرسهای مربوط به خود را تنظیم کنند.



ig.15 General call address format.

اگر وسیله ای نیاز به آدرسهی داشته باشد بعد از این کد به عنوان slave-receiver عمل می کند.

اما بایت دوم دو حالت دارد:

- هنگامی که بیت کم ارزش آن صفر باشد.
- هنگامی که یک باشد.

در حالتی که B صفر است چند حالت داریم :

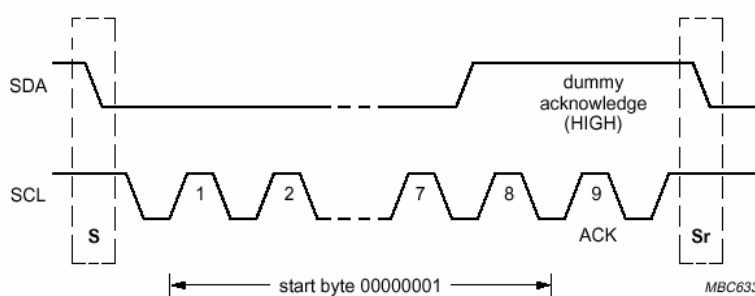
- ریست کردن و نوشتن قسمت قابل برنامه ریزی آدرس slave بوسیله سخت افزار. 00000110(06H)
- نوشتن قسمت قابل برنامه ریزی slave بوسیله سخت افزار. در این حالت دستگاه ریست نمی شود. 00000100(04H)
- به عنوان بایت دوم نباید استفاده شود. 00000000(00H)

باید از باقی کدها صرف نظر کرد.

هنگامی که بیت B یک است به Hardware general call معروف است و به این معناست که توالی توسط سخت افزار مانند keyboard scanner که نمی تواند برای ارسال یک آدرس slave مورد نظر برنامه ریزی شوند ، ارسال می گردد. هفت بیت دیگر شامل آدرس hardware master است که بوسیله یک میکروکنترلر تشخیص داده می شود. در بعضی از سیستم ها این hardware master به صورت slave-receiver عمل می کند که توسط یک master پیکربندی کننده ، آدرس slave که باید به آن داده ارسال گردد ، تعیین می شود.

Start byte : برای کاهش میزان دسترسی میکروها به این باس از این بایت استفاده می شود. ابتدا یک میکرو با سرعت کم از

کند تا یکی از  
به حالت عادی  
گیرند) تشخیص  
بررداری خود را  
داده های روی  
در این حالت  
است:



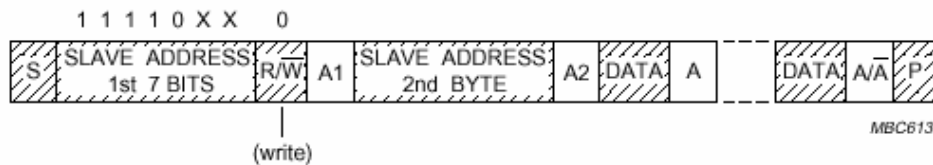
SDA نمونه برداری می  
این ۷ بیت را ( که نسبت  
زمان طولانی تری را می  
دهد. سپس سرعت نمونه  
افزایش می دهد تا بتواند  
SDA را تشخیص دهد.  
رویه شروع به صورت زیر

Fig.18 START byte procedure.

- وضعیت START (S)
- بایت START (00000001)
- پالس ساعت مربوط به Acknowledge
- وضعیت شروع مجدد (Sr) Repeated start

## آدرس دهی ۱۰ بیتی :

همان طور که گفته شد حالت 1111XXX برای این مقصود نگه داشته شده است. اما باز هم تنها از حالت 11110XX برای این مقصود استفاده شده است و حالت 11111XX برای مقاصد آتی رزرو شده است. بیت هشتم نیز مانند حالت ۷ بیتی مشخص کننده Read/Write می باشد. بیت دوم پس از این بایت بیان گر ادامه آدرس Slave مورد نظر می باشد. مانند حالت ۷ بیتی در این حالت نیز وضعیتهای مختلفی وجود دارد، که در شکلهای زیر می توان به آنها اشاره کرد:



ج.26 A master-transmitter addresses a slave-receiver with a 10-bit address.

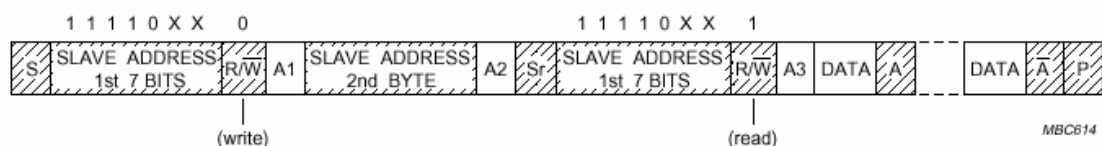


Fig.27 A master-receiver addresses a slave-transmitter with a 10-bit address.

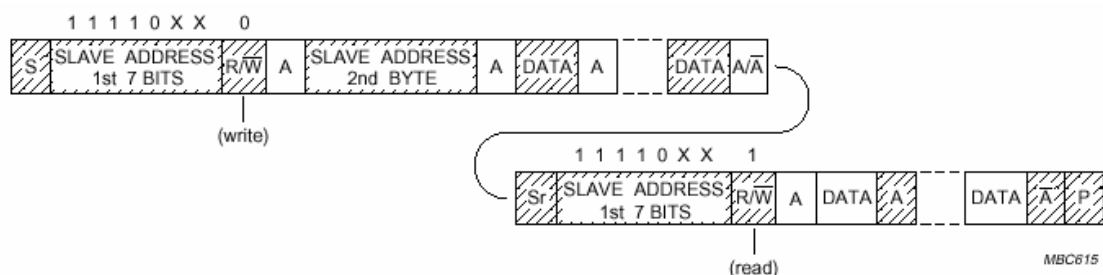


Fig.28 Combined format. A master addresses a slave with a 10-bit address, then transmits data to this slave and reads data from this slave.

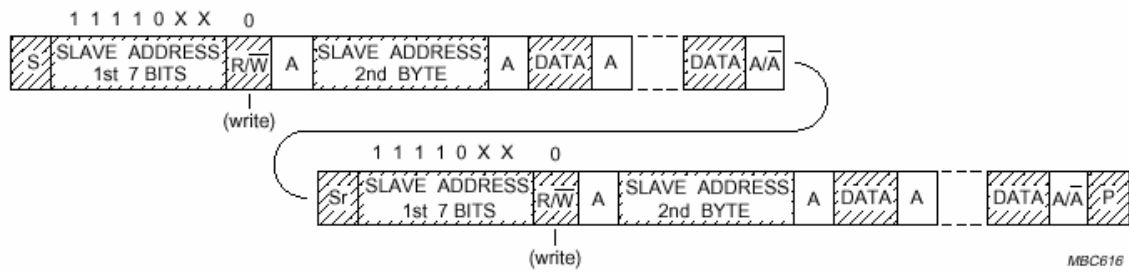


Fig.29 Combined format. A master transmits data to two slaves, both with 10-bit addresses.

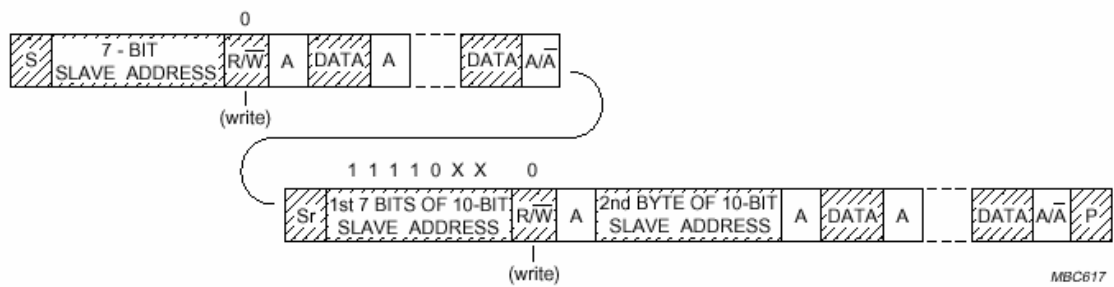


Fig.30 Combined format. A master transmits data to two slaves, one with a 7-bit address, and one with a 10-bit address.

## تحولات در Fast-mode :

بعد از حالت استاندارد با توجه به نیاز به سرعت بالاتر حالت Fast-mode ابداع گردید که دارای ویژگی های زیر بود:

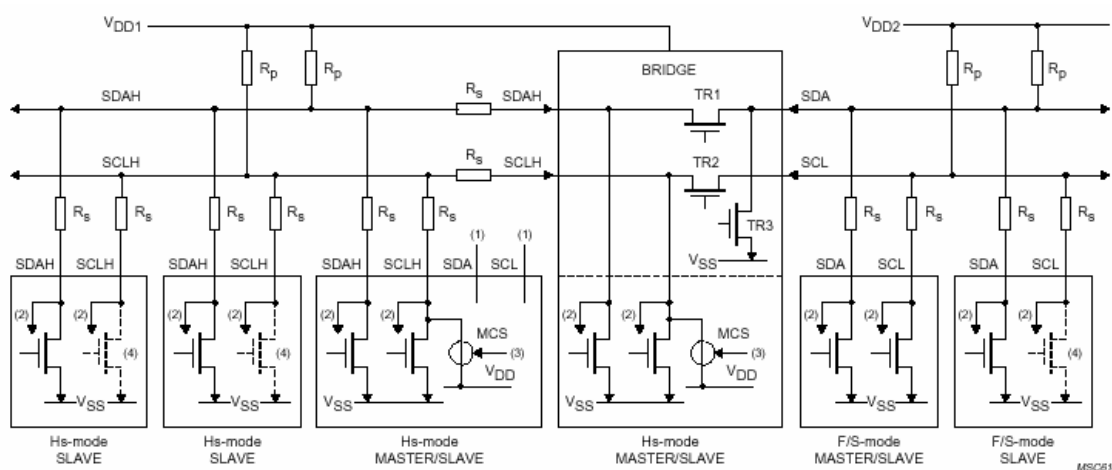
- حداکثر سرعت 400 kbit/s
- زمانبندی سیگنالهای SDA و SCL تطبیق داده شد.
- در نظر گرفتن سیستم حذف نویزهای سوزنی و trigger Schmitt در ورودی دستگاههای Fast-mode
- در بافرهای خروجی از کنترل شیب برای لبه پایین رونده استفاده شد.
- دستگاههای pull-up خارجی با زمان خیز کم برای این باس تطبیق داده شد.

برای کمتر از 200pf از pull-up های مقاومتی و برای بیشتر از آن از منابع جریان ( حداکثر 3mA ) یا مدارات مقاومتی سوئیچینگ استفاده شد.

## تحولات در High Speed-mode (HS-mode) :

در این گونه وسایل :

- یک بافر خروجی Open-Drain برای سیگنال SDAH (یک ترکیب از مدارات open-drain pull down و current-source pull-up بر روی خروجی SCLH است که زمان خیز را برای SCLH کاهش می دهد.
- Arbitration و همزمان سازی clock وجود ندارد بلکه این عمل در زمانی که از حالت Fast به High تغییر وضعیت می دهیم صورت می گیرد.
- دارای پلهای داخلی بودند که برای اتصال SDAH و SCLH به SDA و SCL در حالت Fast-mode استفاده می شوند.
- که معمولاً در دو سطح ولتاژ متفاوت عمل می کنند.
- مقاومتیهای (اختیاری) RS باعث حفاظت سطوح I/O از ضربه های سوزنی ولتاژ بالا و تداخل می شود.
- مقاومتیهای پول آپ (RP) نیز وجود دارند ولی برای بالاتر از 100pf از منابع جریان پول آپ خارجی رسیدن به زمان خیز مورد استفاده می شود.



- (1) Bridge not used. SDA and SCL may have an alternative function.
- (2) To input filter.
- (3) Only the active master can enable its current-source pull-up circuit.
- (4) Dotted transistors are optional open-drain outputs which can stretch the serial clock signal SCL or SCLH.

Fig.24 Bus system with transfer at Hs- and F/S-mode speeds.



## فرمت ارسال داده های سریال در HS-mode :

تمام وسایلی که در حالت HS-mode باید کار کنند در ابتدا در حالت Fast-mode قرار دارند و تنها بعد از وضعیتهای زیر وارد حالت HS-mode می گردند:

۱- وضعیت (s) Start

۲- کد به صورت ۸ بیتی (00001XXX)

۳- بیت Not-Acknowledge ( $\bar{A}$ )

بعد از این وضعیتهای وارد حالت HS-mode شده و با توجه به نوع آدرس دهی ۷ بیتی و یا ۱۰ بیتی آدرس دهی آغاز می گردد.

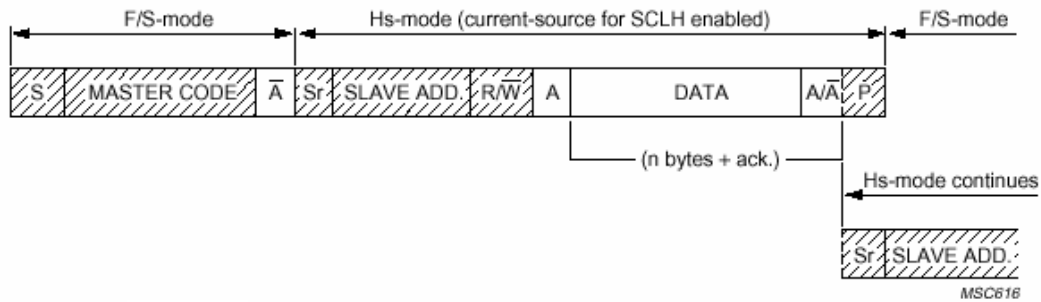
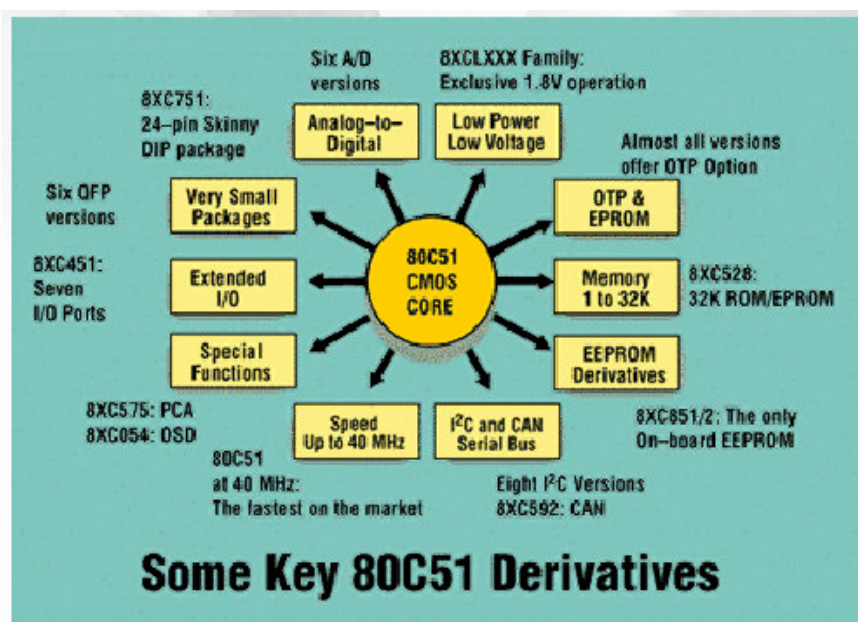


Fig.21 Data transfer format in Hs-mode.

## کاربردهای I<sup>2</sup>C :

شرکت فیلیپس پایه و اساس میکروهای خود را بر معماری 80c51 بنا نهاده است. با توجه به ساختار کوچک و ارزان این تراشه می توان از آن در اکثر سیستم های کنترلی ارزان قیمت استفاده کرد. شرکت مذکور تراشه هایی در کاربردهای متنوع ارائه داده است. در مجموع این تراشه ها شامل ROM(OTP/Flash) و RAM قابل افزایش ، پورت I<sup>2</sup>C ، I/O گسترده ، ADC و... می باشند.



حافظه های قابل برنامه ریزی در قالب های مختلفی ارائه می شوند نظیر:

ISP (In-System Programmable)

IAP (In-Application Programmable)

OTP (One Time Programmable)

MTP (Multi Time Programmable)

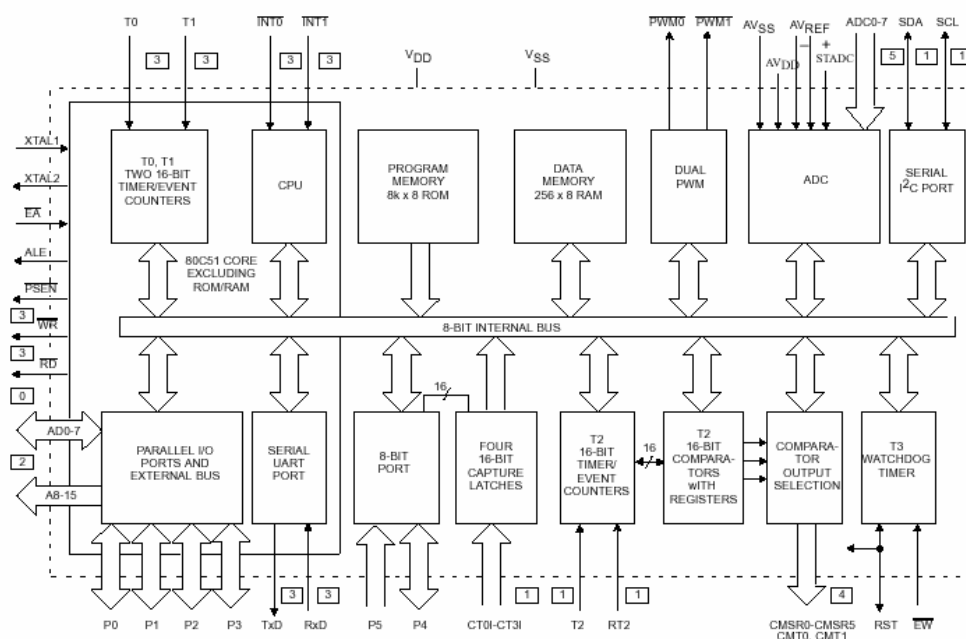
تقریباً تمامی میکروهای فیلیپس I<sup>2</sup>C را پشتیبانی می کنند. تعدادی هم پروتکل CANBus را پشتیبانی می کنند مانند :

C591A۷

- 8XCL410   • 8XC557E4   • 8XC654
- 8XC524   • 8XC557E6   • 8XC751
- 8XC528   • 8XC557E8   • 8XC752
- 8XC552   • 8XC591   • 87LPC762
- 8XC554   • 8XC652   • 87LPC764

لیست میکروهای فیلیپس سازگار با I<sup>2</sup>C

به عنوان نمونه میکروکنترلر ۸۰C552A (PLCC-68):

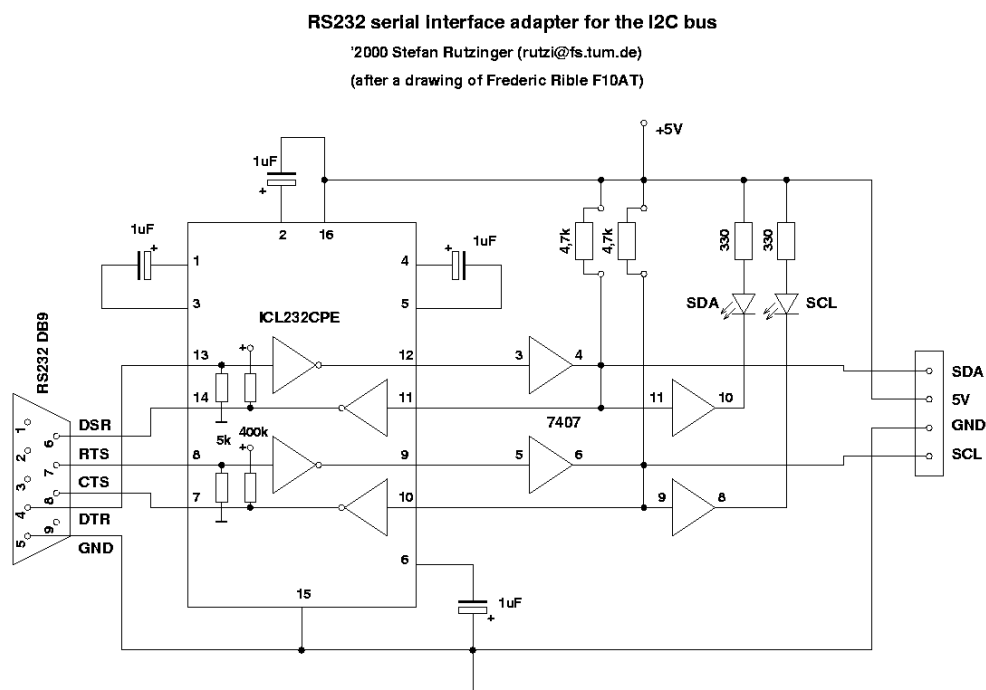


میکروکنترلر CS6208:

برای کاربردهای شبکه با I<sup>2</sup>C Interface بمنظور پیاده سازی شبکه های Master/Slave استفاده میشود. این قطعه پروتکل های TCP/IP, ARP, IP, ICMP, UDP, DHCP, BOOTP را پشتیبانی می کند.

## RS-232 و I<sup>2</sup>C :

با توجه به کاربرد گسترده RS-232 در ارتباط دستگاه های مختلف ، وجود رابطی که RS-232 را به I<sup>2</sup>C تبدیل کند، میتواند زمینه های جدیدی را پیش پای طراحان بگذارد. در زیر نمونه ای از مدار آن را می بینید.



مثال ۱ : استفاده از میکروهای AT89C2051/AT89C4051 در ارتباط با قطعاتی با رابط I<sup>2</sup>C

قطعات مورد نیاز در این مثال : رابطهای RS-232 و DB9، Header برای نمایش LCD ، PCF8574 I/O ،

Extender (AT24C04 (I<sup>2</sup>C EEPROM).

البته قابل ذکر است که این ارتباط با برنامه نویسی مناسب میکروکنترلر ۴۰۵۱/۲۰۵۱ تکمیل می شود.

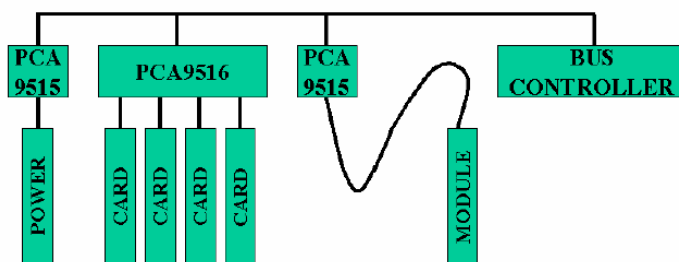
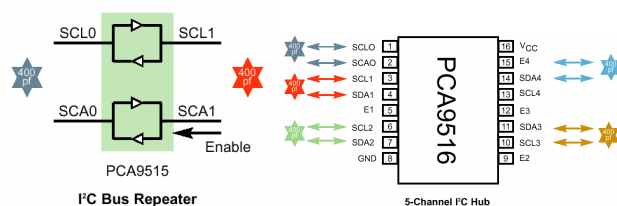


## : Extender , Repeater & Hub

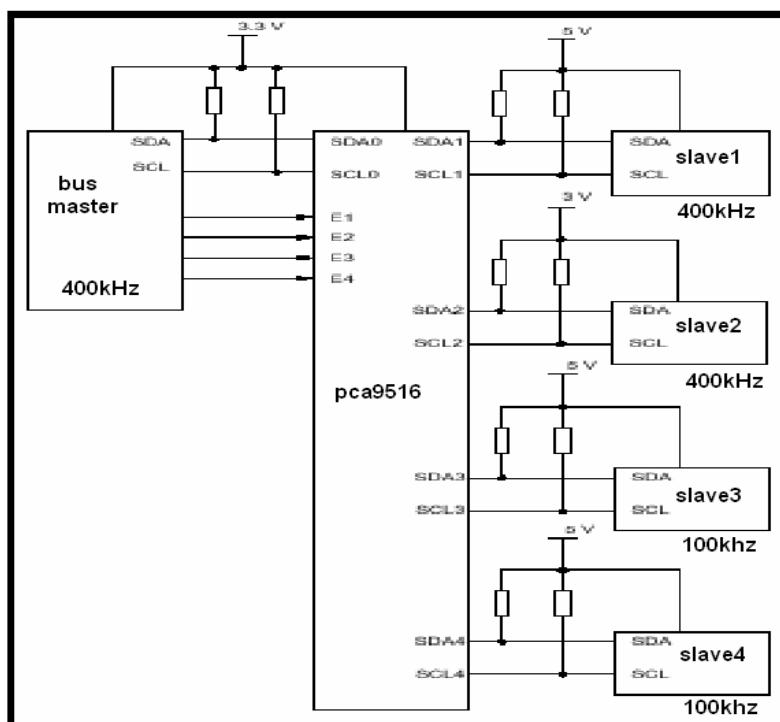
از جمله : PCA9511-16 , PCA9518 , P82B715 , P82B96

که مزایای زیر را دارا هستند :

۱. اجازه می دهند که امپدانس خط بیشتر از ۴۰۰pf گردد.
  ۲. طولانی شدن خط
  ۳. امکان وجود منابع و ولتاژ مختلف در یک سیستم
  ۴. امکان ایزولاسیون نوری برای ایمنی بیشتر
  ۵. قرار دادن کارتهای بدون منبع تغذیه به خط فعال I<sup>2</sup>C
  ۶. ایزوله کردن قسمتهایی از سیستم که منبع تغذیه آنها به دلایلی قطع می شود.
- مثال ۱:



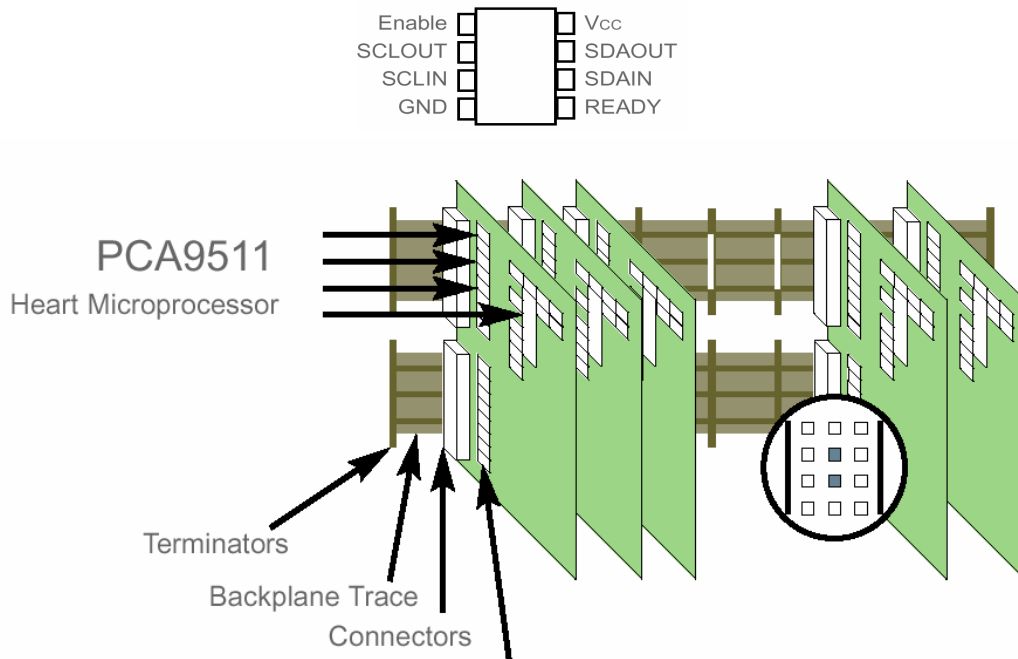
مثال ۲: استفاده از HUB





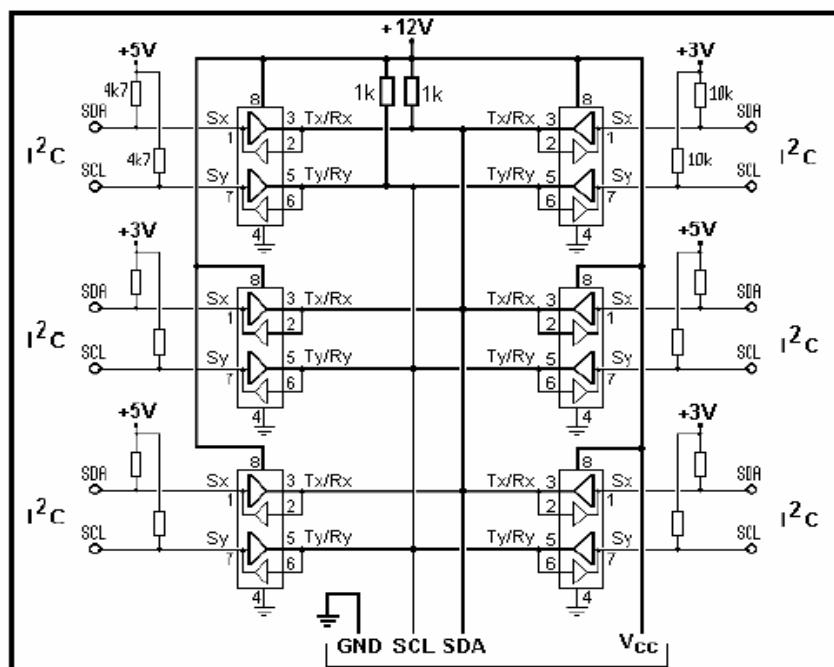
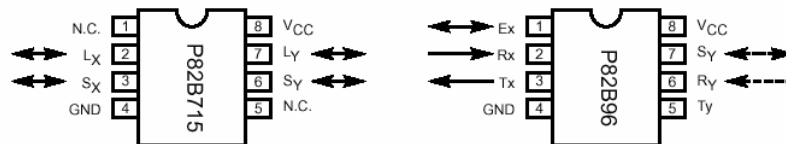
### مثال ۳: I<sup>2</sup>C Hot swap Buffer

از این بافرها برای اضافه کردن وسایل جانبی به باس استفاده می شود. علاوه بر ایزولاسیون دو جهت، امکان وجود ظرفیت حداکثر ۴۰۰ PF را در هر انشعاب می دهد. همچنین برای ایمنی در مقابل نویز سطح ولتاژ خطوط SDA و SCL را تا حد ۱ ولت کاهش داده است. خروجی درین باز با امپدانس خروجی بالا و جریان دهی بهتر از مزیت های این IC می باشد.



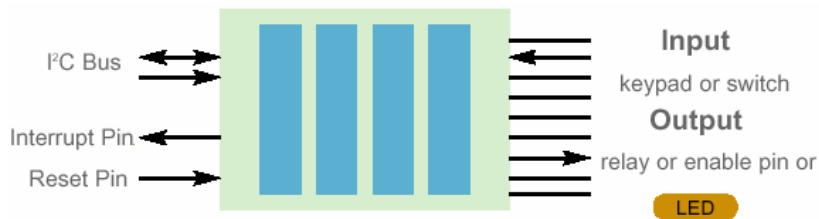
### مثال ۴: استفاده از کابل USB برای انتقال اطلاعات با رابط I<sup>2</sup>C و I<sup>2</sup>C Bus Extenders

توجه: استفاده از I<sup>2</sup>C Bus Extenders امکان وجود ظرفیت حداکثر ۴۰۰ PF را در طرف دیگر فراهم می کند.



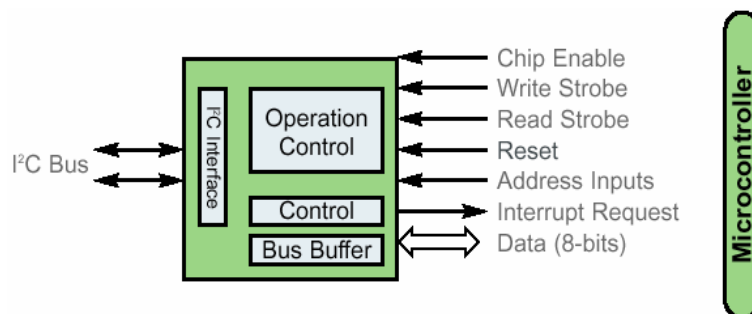
## : I<sup>2</sup>C general purpose I/O Expanders

- قابلیت اتصال ورودی و خروجیهای موازی به I<sup>2</sup>C, SMBus
- دارای ۴ رجیستر قابل تنظیم برای تنظیم I/O ها، مقادیر ورودی و خروجی ها
- دارای وقفه (تنها در 9554)



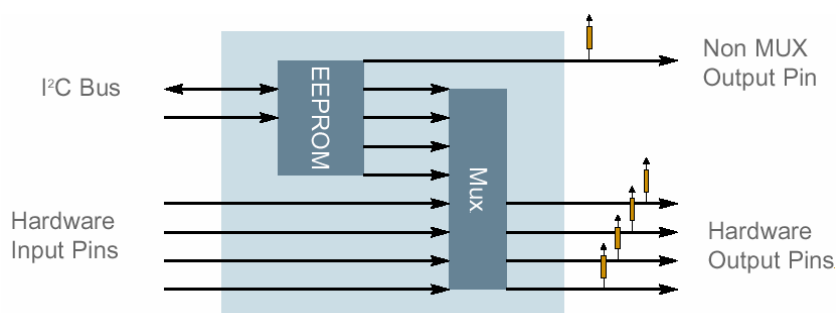
- PCA9554, 8-bit I<sup>2</sup>C and SMBus I/O Port with Interrupt
- PCA9554A, 8-bit I<sup>2</sup>C and SMBus I/O Port with Interrupt
- PCA9555, 16-bit I<sup>2</sup>C and SMBus I/O Port with Interrupt
- PCA9556, Octal SMBus and I<sup>2</sup>C Registered Interface
- PCA9557, Octal SMBus and I<sup>2</sup>C Registered Interface

## : I<sup>2</sup>C Controller ارتباط باس موازی با I<sup>2</sup>C Controller



	Voltage range	Max I <sup>2</sup> C freq	Clock source	Parallel interface
PCA8584	4.5 - 5.5V	90 kHz	External	Slow
PCA9564	2.3 - 3.6V w/5V tolerance	360 kHz	Internal	Fast

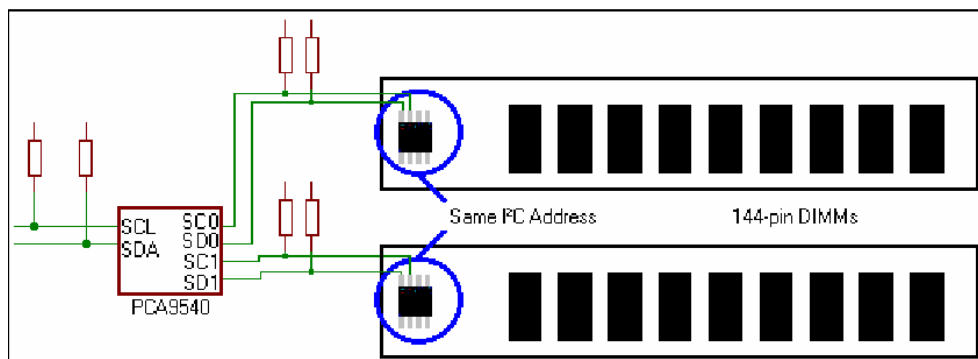
## : Multiplexed/Latched I<sup>2</sup>C EEPROM



- PCA8550, 4-bit Multiplexed/I-bit Latched 5-bit EEPROM
- PCA9559, 5-bit Multiplexed/I-bit Latched 6-bit EEPROM
- PCA9560, Dual 5-bit Multiplexed/I-bit Latched EEPROM
- PCA9561, Quad 6-bit Multiplexed EEPROM

مثال: کاربرد مالتی پلکسر

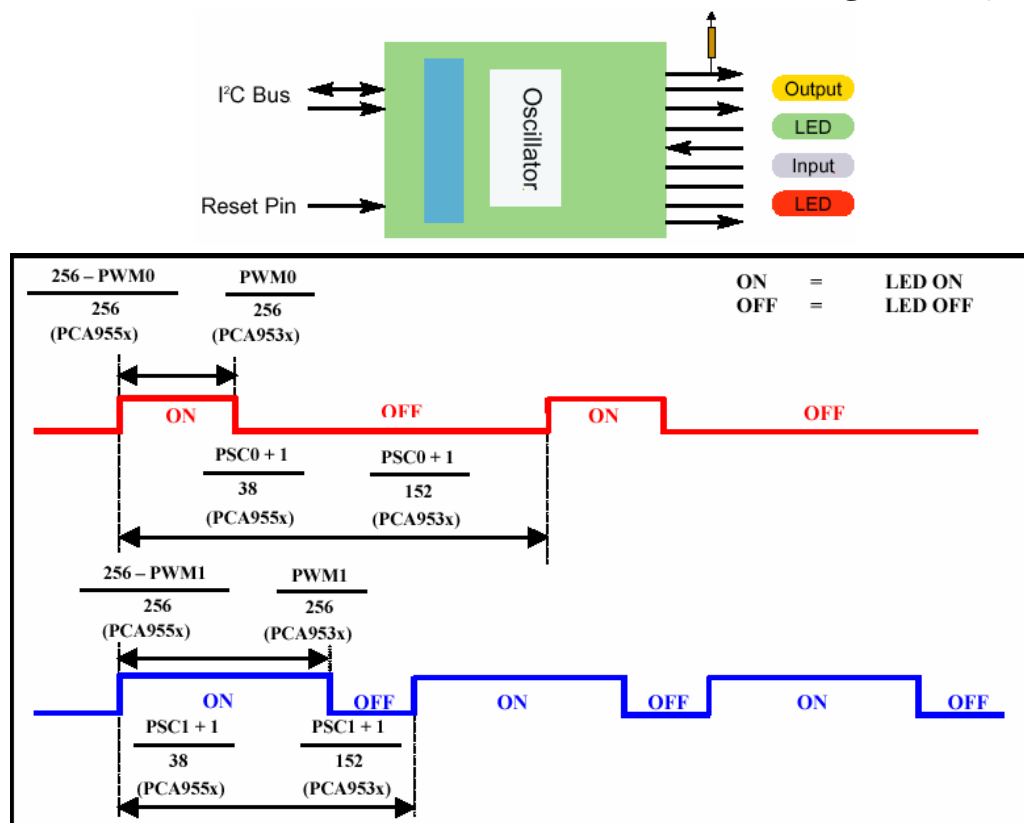
در اکثر RAM های کامپیوتری از این IC استفاده می شود.



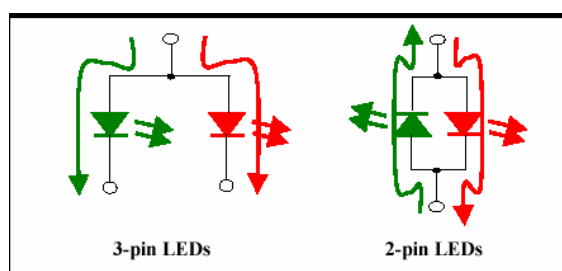
## I<sup>2</sup>C Device for LED Display Control

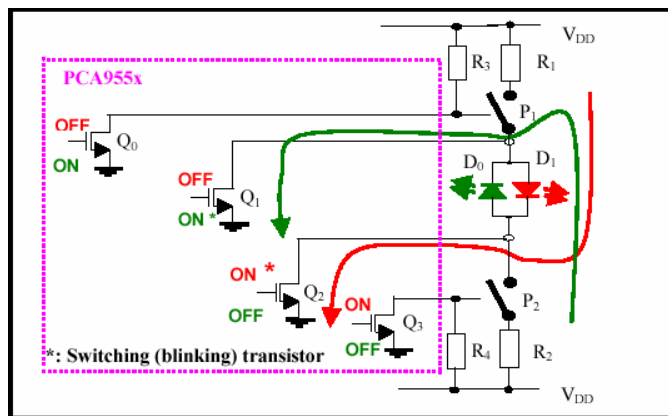
از جمله: PCA9530-33 , PCA9550-53 , SAA1064

- دارای کریستال و اسیلاتور داخلی می باشند.
- دارای ۲ حالت برای چشمک زدن (blinking) می باشند.
- جریان بالای خروجی ها (open drain)

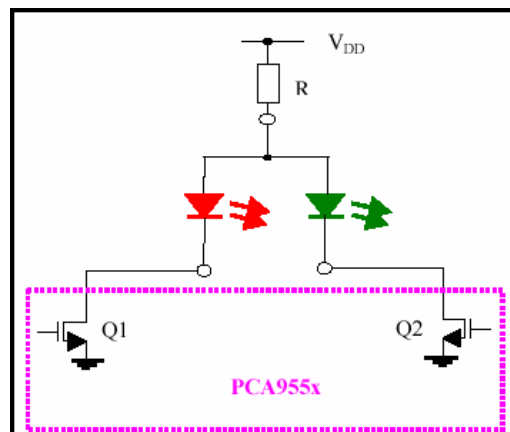


مثال ۱ : استفاده از PCA955X





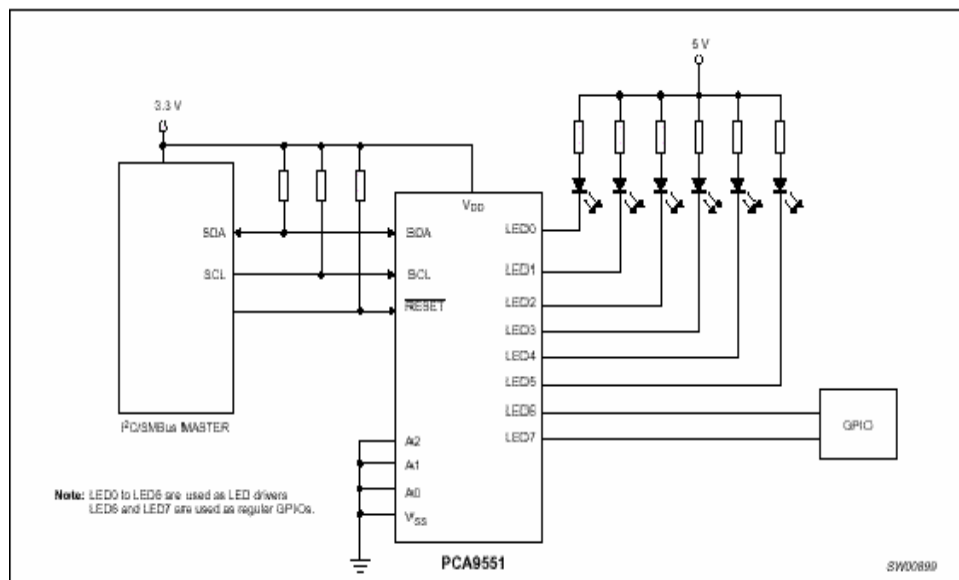
برای دو LED پایه



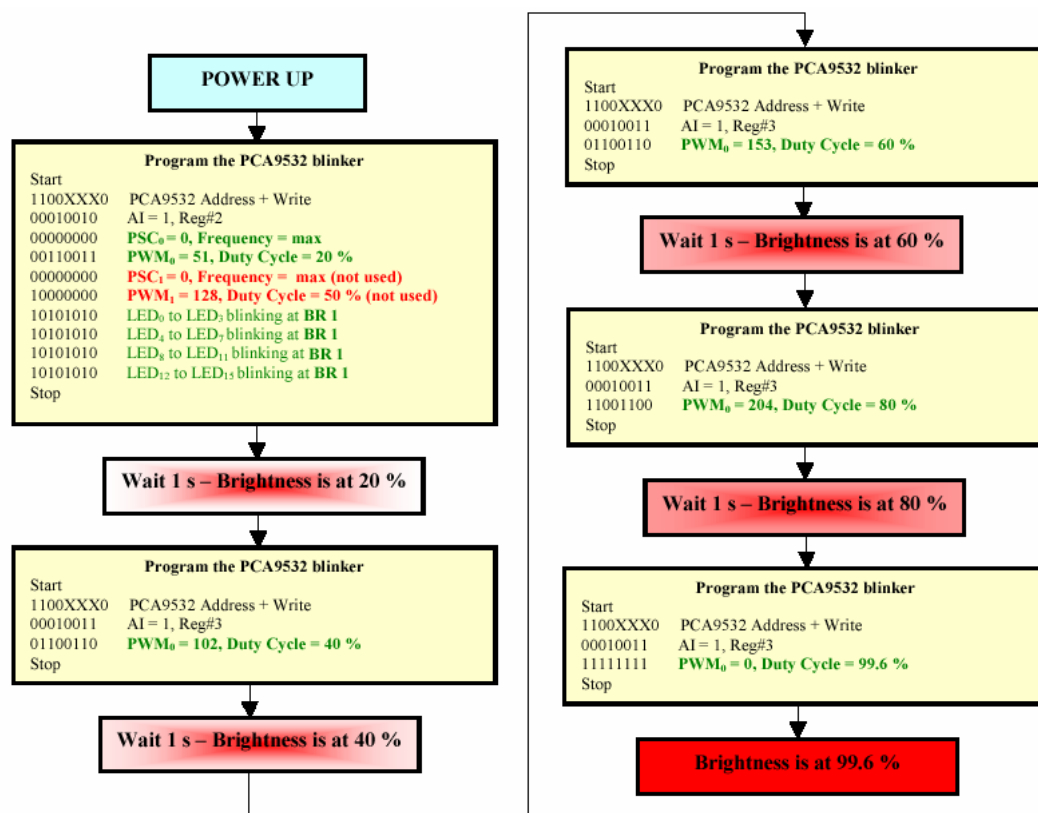
برای سه LED پایه

- مقاومت‌های  $R_2$  و  $R_1$  برای محدود کردن جریان LED و مقاومت‌های  $R_3$ ,  $R_4$  برای بایاس مدار به کار می‌رود.

مثال ۲: چشمک زدن (Blinking)

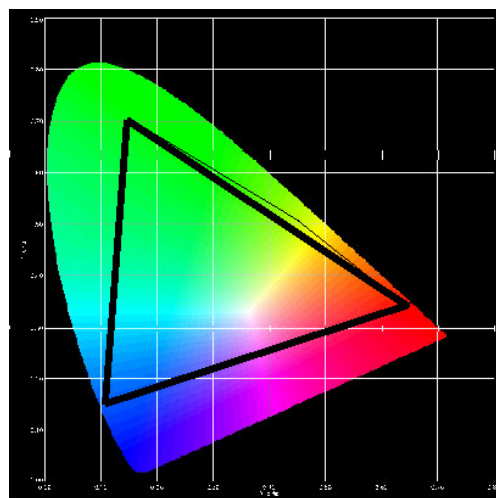


مبحث دیگر در مورد LED ها ، مربوط به کنترل شدت نورمی باشند.با تغییر duty cycle و همچنین تنظیم متوسط جریان که به LED ها می رسد می توان شدت نور آنها را کنترل کرد.



### LED Dimmers

برای اینکه در LED بتوان ۲۵۶ رنگ مختلف را بوجود بیاوریم. بدین منظور باید duty cycle را در ۲۵۶ مرحله تغییر دهیم. حال اگر ما مجموعه ای از LED آبی ، سبز ، قرمز داشته باشیم و آنها را بوسیله IC های LED Dimmer (مانند PCA953X) کنترل کنیم می توانیم  $۲۵۶ \times ۲۵۶ \times ۲۵۶ = ۱۶۷۷۷۲۱۶$  رنگ را بوجود بیاوریم.



ایجاد طیف رنگی بوسیله PCA953X



### سایر کاربردها:

این پروتکل ارتباطی در سنسورها نیز کاربرد گسترده ای دارد نظیر IC های LM75A(Philips),LM82(National Semiconductor),AD7416(Analog Device) CMOS Image Sensors در همچنین می شوند.همچنین در مانند (Fujitso)MB86S02A ، کارتهای Server Management ، Motorola Handheld Computer کاربرد دارد. در ضمن اکثر IC های شرکت Xicor که برای ارتباط با کامپیوتر نرم افزار Labview می باشند، از پروتکل ارتباطی I<sup>2</sup>C استفاده می کنند.

- [1]. THE I<sup>2</sup>C -BUS SPECIFICATION - VERSION 2.1 - JANUARY 2000
- [2]. I<sup>2</sup>C BUS – Quarndon Electronics Ltd. – [www.quarndon.co.uk](http://www.quarndon.co.uk)
- [3]. Westermo Handbook – Industrial data communication – Edition 3.0 – westermo teleindustri AB, Sweden
- [4]. And the other Internet based references, papers, eBooks, catalogs and articles.