

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM
Departamento de Mecânica Computacional – DMC

Trabalho de Graduação

Levantamento Bibliográfico das Tecnologias dos Acelerômetros Comerciais

Estudante: Felipe Marcus Carneiro – RA: 991760
**Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira – DMC/
FEM/UNICAMP**

Índice

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.....	1
Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM.....	1
Departamento de Mecânica Computacional – DMC.....	1
Trabalho de Graduação.....	1
Levantamento Bibliográfico das Tecnologias dos Acelerômetros Comerciais.....	1
Índice.....	2
Objetivo.....	4
Resumo.....	4
1.Introdução.....	5
Funcionamento de um Air Bag.....	5
Acelerômetros.....	7
Princípio Físico de acelerômetros.....	8
Movimento.....	9
Tipos de movimentos.....	9
Princípios de Acelerômetros.....	10
Modelos básicos:.....	10
Sistema Massa-Mola.....	10
Frequência Natural e Amortecimento.....	11
Efeitos da Vibração.....	12
Aplicações de sensores de movimento.....	13
Tipos de Medições:.....	13
Aceleração em modo contínuo.....	14
Vibração.....	14
Choque.....	14
Tipos de Acelerômetros.....	14
Tipos Apresentados:.....	14
Potenciométrico.....	15
LVDT.....	15
Relutância Variável.....	16
Piezoelétrico.....	16
Capacitivos.....	17
Microfabricação.....	18
2.Modelos Comercialmente Disponíveis.....	19
Silicon Designs.....	19
Geral.....	19
Aplicações atuais.....	19
Detalhes.....	19
Elementos sensores micro-fabricados.....	20
Fabricação do Elemento Sensor.....	22
Chips Eletrônicos.....	22
O modelo 1210 – Acelerômetro digital.....	22
Analog Devices.....	24
Fabricação e Funcionamento.....	24
O ADXL50.....	27
Características.....	27
Motorola.....	29
MMA3202.....	29
Características.....	29
Aplicações típicas.....	29
3.Análise.....	32
Geral.....	32
Aquisição de dados: Vibração e choque.....	33
Como funciona.....	33
Especificações Importantes.....	33
Por fim, escolhendo a tecnologia apropriada para sensor de aceleração:.....	33

Ângulo e Inercial.....	33
Vibração e Choque.....	33
Nota-se, que as questões comuns em aquisição de dados são:.....	33
Proposta de Comparação para os Acelerômetros.....	33
Confronto de informações.....	33
Preço.....	34
Faixa de Operação de Aceleração e Frequência.....	35
Processo de Fabricação.....	35
Resposta em Frequência.....	35
Temperatura.....	35
Sensibilidade e Linearidade.....	36
Ruído.....	36
Geometria do Capacitor.....	36
4.Conclusão.....	36
5.Bibliografia.....	37

Objetivo

Compilar informações sobre as tecnologias dos acelerômetros comercialmente disponíveis para aplicações de ativação de *air bags* visando o projeto de acelerômetros microfabricados no DMC.

Resumo

Neste trabalho é feito um levantamento das características de acelerômetros requeridas para ativação de um air bag de automóvel e verificadas as soluções encontradas industrialmente. São comparados três modelos de acelerômetros disponíveis comercialmente, sendo que um deles é específico da aplicação e os outros possuem o mesmo princípio mas não são dedicados. Um enfoque especial é dado nos parâmetros utilizados para definir os produtos, utilizando-os para comparar os modelos.

1. Introdução

Funcionamento de um Air Bag

Quando um carro colide contra um obstáculo, o passageiro tende a projetar-se contra o vidro, ocasionando acidentes que podem ser fatais. Este efeito ocorre devido à rápida mudança do momentum (massa vezes velocidade), que vai a zero em um intervalo muito curto de tempo (menos de 1 s) e a força necessária para tal. O carro desacelera nessa taxa, e o passageiro tende a continuar seu movimento. Em virtude deste tipo de acidente foi criado um conjunto de dispositivos com intuito de evitar esta colisão, o air bag.

O Departamento de Transportes dos Estados Unidos lançou em 1968 seu FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations) para veículos manufaturados. Ela especifica o desempenho requerido de veículos automotivos no requisito segurança, como os critérios para evitar acidentes, o que deve acontecer com os sistemas durante e após o acidente e regulamentações gerais, como manutenção dos sistemas, uso de pneus recauchutados etc. A Parte 571 na norma 201 trata da “Proteção do Ocupante em Impacto Interior” e a norma 202 trata das “Restrições para a Cabeça”. De modo geral estas normas limitam a resistência e o tipo de proteção devido a cada uma das partes descritas. O air bag vem de encontro com o interesse em obedecer estas normas, proporcionando uma segurança a mais para o ocupante.

Seu objetivo é fazer com que o passageiro desacelere à velocidade zero com o mínimo dano possível. Ele trabalha com um grupo de restrições muito apertadas pois o espaço disponível para o desempenho de sua função é limitado pelo espaço entre o volante e o passageiro e o tempo de uma colisão é da ordem de centésimos de segundo. O dispositivo deve ainda estar preparado para responder a colisões a partir de 16 a 24 km/h (10 a 15 mph).

Um elemento chave é que a força de impacto deve ser equivalente a uma colisão frontal com uma barreira imóvel a 10-15 mph. Já que um acidente automobilístico típico dura apenas por volta de 0,125 s (1/8 s), o air bag se ativa entre 15 a 20 ms depois do impacto inicial da colisão. Para criar um colchão entre o ocupante e o interior do veículo, o air bag infla a velocidades de até 200 mph em aproximadamente 30 ms depois do impacto. Isto permite que o ocupante toque uma bolsa completamente inflada em aproximadamente 45 a 50 ms depois do impacto inicial da colisão. Aproximadamente 100 ms depois do impacto a bolsa se esvazia. Ou seja, o processo dura menos de 1s.

Seu princípio de funcionamento baseia-se em três elementos básicos:

- A bolsa de ar propriamente dita, armazenada geralmente no volante, mas mais recentemente nas portas laterais e no lado do passageiro.
- O sistema que infla a bolsa reage Sódio Azide (NaN_3) com nitrato de potássio (KNO_3) para produzir gás nitrogênio. Rajadas quentes de nitrogênio inflam a bolsa. O sistema faz ignição de um propelente sólido que queima extremamente rápido criando um grande volume de gás para inflar a bolsa. A bolsa salta de sua posição de armazenagem

a uma velocidade de 322 km/h (200 mph). Menos de 1 s depois o gás se dissipa e o passageiro pode se mover.

- O sensor é o dispositivo que aciona a bolsa direta ou indiretamente. O sensor recebe a informação de um acelerômetro montado em um chip.

Os modelos mais antigos destes sensores utilizavam esferas que rolavam e acionavam os contatos do circuito de controle quando o veículo desacelerava bruscamente como numa colisão. Outros baseavam-se na utilização de uma combinação com molas calibradas para o fechamento do contato no circuito elétrico. Os modelos atuais são acelerômetros capacitivos e sua utilização será explicada neste texto.

Melhorias na operação de air bags ainda estão a caminho. Os chamados “air bags inteligentes” considerarão fatores como a velocidade do veículo, o uso do cinto de segurança, peso do ocupante e posição do assento. Como um resultado, air bags se tornarão mais seguros para crianças ou adultos pequenos. Outras inovações incluirão air bags de estágios múltiplos que irão variar as taxas em que se inflam, e air bags para impactos laterais ou para ocupantes fora de posição.

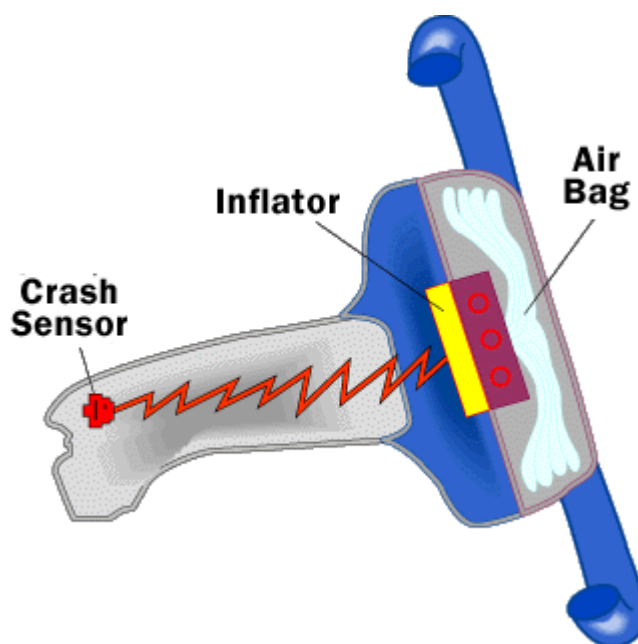


Figura 1 – Sistema de Air Bag automotivo

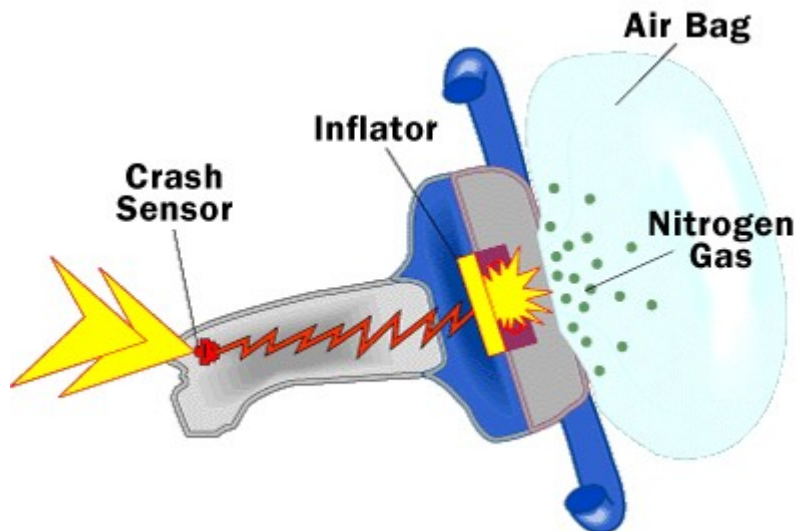


Figura 2 – Acionamento do sistema de Air Bag

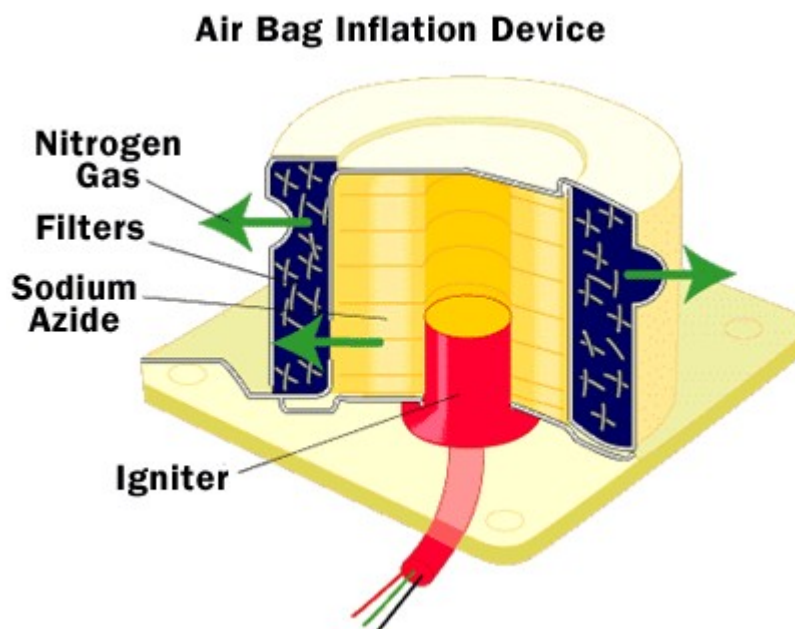


Figura 3 – Sistema de Ignição da Bolsa

Acelerômetros

Acelerômetros encontram aplicações em diversas áreas, incluindo usos automotivos como air bags, navegação, detecção de atividade para máquinas de passo, monitoramento de máquinas, etc. Acelerômetros microfabricados estão abrindo rapidamente novas áreas de aplicação, graças ao seu custo/volume reduzidos e elevado desempenho em muitos (mas não todos) projetos.

... importante notar que o ambiente automotivo inclui temperaturas entre -40 a 150°C , choques mecânicos até 50 g, vibração até 15 g, campos eletromagnéticos até 200 V/m, e

exposição a uma variedade de químicos (e.g., combustíveis, óleo, fluido de freio, fluido de transmissão, fluido anti-congelante, spray de sal, etc.). Não é necessário dizer que, mesmo para transdutores que não precisam de gabinetes para sua embalagem, como acelerômetros, estas condições adversas fazem a transição da demonstração de laboratório para aplicações práticas mais desafiadoras.

(Note que no contexto de acelerômetros, a unidade “g” é usada para representar a aceleração devida à gravidade da Terra, que é $9,80665 \text{ m/s}^2$ a 45° de latitude ao nível do mar, e não deve ser confundida com gramas).

Tabela 1 – Faixas de Operação de Acelerômetros e Aplicações

Faixa de operação	+/- 1 g	Freio anti-bloqueio (ABS) / Sistema de controle de tração (TCS)
	+/- 2 g	Movimento de corpo vertical
	+/- 40 g	Movimento da roda
	+/- 50 g	Ativação de air bag
	+/- 100°/s	Resposta dos pneus
Precisão	+/- 2%	5% a temperaturas extremas
Sensibilidade (de eixo) cruzada	<1 a 3%	Todas aplicações
Sobrevivência a choque	>500 g	1 m queda em concreto
Resposta em frequência	0 a 5 Hz	Movimento vertical
	0,5 a 50 Hz	Movimento horizontal (até 1 kHz para air bags)
Faixa de temperatura	-40 a 85°C	Maioria das aplicações
	-40 a 125°C	Sob capota

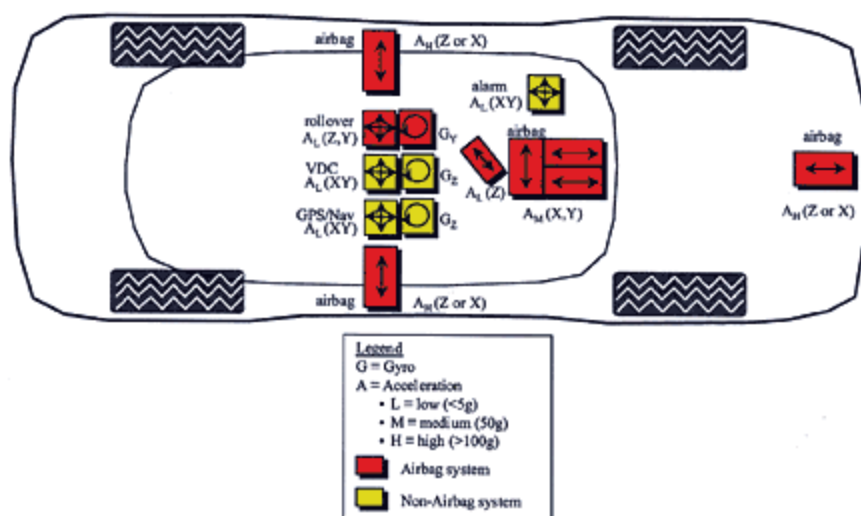


Figura 4 – Localização de sensores MEMS em automóveis atuais

Princípio Físico de acelerômetros

Movimento

Sensores de movimento são desenhados para medir a taxa de mudança de posição, localização, ou deslocamento de um objeto que está ocorrendo. Se a posição de um objeto em função do tempo é $x(t)$, então a primeira derivação dá a velocidade do objeto, $v(t)$, se uma direção é também especificada. Se a velocidade do objeto também está mudando, então a primeira derivação da velocidade dá a aceleração. Isto é também a segunda derivação da posição.

$$\begin{aligned}v(t) &= \frac{dx(t)}{dt} \\a(t) &= \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}\end{aligned}\quad (1) \text{ e } (2)$$

A forma primária do sensor de movimento é o acelerômetro. Este dispositivo mede a aceleração, $a(t)$, de um objeto. Integrando as equações 1 e 2 é fácil mostrar que o acelerômetro pode ser usado para determinar ambas a rapidez e a posição do objeto também.

$$\begin{aligned}v(t) &= v(0) + \int_0^t a(t) dt \\x(t) &= x(0) + \int_0^t v(t) dt\end{aligned}\quad (2) \text{ e } (3)$$

Assim, no acelerômetro nós temos um sensor que pode fornecer informações sobre aceleração, rapidez (ou velocidade), e posição.

O projeto de um sensor para medir movimento é geralmente designado para o tipo de movimento que será medido. Ajudará entender-se estes sensores se tiver-se uma noção clara destes tipos de movimento.

A unidade apropriada de aceleração é metros por segundo ao quadrado (m/s^2). Então velocidade será em metros por segundo (m/s) e posição com certeza em metros (m). Geralmente, aceleração é expressa pela comparação com a aceleração devida à gravidade na superfície da Terra. Esta quantidade de aceleração, que é aproximadamente $9,8 m/s^2$, é chamada um “ g_e ”.

Tipos de movimentos

- Retilíneo (Tipicamente menos que alguns g 's)
- Angular (Rotações sobre o mesmo eixo)
- Vibração (Movimento periódico, pode atingir 100 g 's ou mais)

- Choque (Desacelerações em curto espaço de tempo, tipicamente milissegundos que podem chegar a mais de 500 g's)

Princípios de Acelerômetros

Existem muitos processos físicos que podem ser usados para desenvolver um sensor para medir aceleração. Em aplicações que envolvem vôo, tais como aviões e satélites, acelerômetros são baseados em propriedades de massas rotativas. No mundo industrial, entretanto, o projeto mais comum é baseado numa combinação da lei de Newton de aceleração de massa e a lei de Hooke de ação de mola.

Modelos básicos:

- Sistema Massa-Mola
- Frequência Natural e Amortecimento
- Efeitos da Vibração

Sistema Massa-Mola

A lei de Newton simplesmente afirma que se uma massa, m , é submetida a uma aceleração, a , então deve haver uma força F agindo na massa e dada por $F = ma$. A lei de Hooke afirma que se uma mola de constante de mola k está esticada (estendida) de sua posição de equilíbrio por uma distância Dx , então deve haver uma força agindo na mola dada por $F = kDx$.

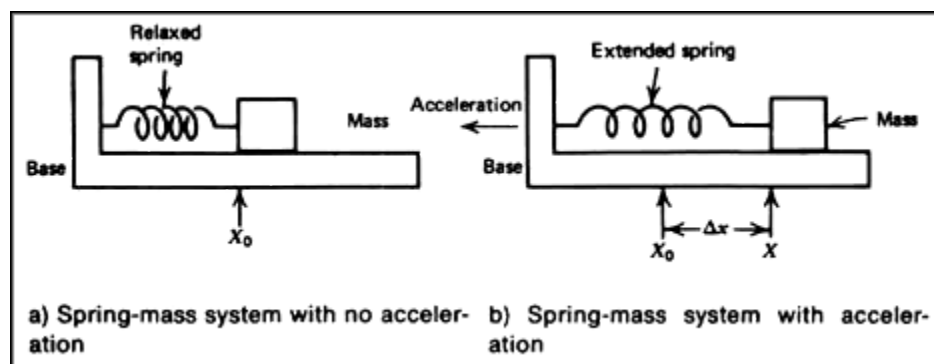


Figura 5 – O acelerômetro de sistema massa-mola básico

Na figura nós temos uma massa que está livre para deslizar numa base. A massa está conectada à base por uma mola que está em seu estado não estendido e não exerce força sobre a massa. Na figura seguinte, o conjunto todo é acelerado para a esquerda como mostrado. Agora a mola estende-se para fornecer a força necessária para acelerar a massa. Esta condição é descrita pela equação da lei de Newton e Hooke

$$ma = kDx \quad (5)$$

Onde k = constante da mola em N/m

Dx = extensão da mola em m

m = massa em quilogramas

a = aceleração em m/s²

A equação acima permite a medição da aceleração ser reduzida a uma medida da extensão linear da mola (deslocamento linear) porque

$$a = \frac{k}{m} \Delta x \quad (6A)$$

Observa-se que este equacionamento serve ao caso estático, se tratando de vibração harmônica (que será mostrada adiante) deve-se utilizar a expressão geral:

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m} x \quad (6B)$$

Se a aceleração é reversa, o mesmo argumento físico aplicaria exceto que a mola estaria comprimida ao invés de estendida. Equação acima ainda descreve a relação entre deslocamento da mola e aceleração.

O princípio massa-mola aplica-se a muitos projetos de acelerômetro comuns. A massa que converte a aceleração em deslocamento da mola é chamada como massa de teste ou massa sísmica. Nós vemos, então, que a medida de aceleração reduz a uma medida de deslocamento linear; a maioria dos projetos difere em como esta medida de deslocamento é feita

Frequência Natural e Amortecimento

Em exames mais profundos do princípio simples descrito aqui, nós encontramos uma outra característica de sistemas massa-mola que complica a análise. Em particular, um sistema consistindo de uma mola e massa unidas sempre exhibe oscilações em alguma frequência natural característica. A experiência conta-nos que se nós puxamos uma massa para trás e então soltamos (na ausência de aceleração), ela será puxada de volta pela mola, ultrapassando o equilíbrio, e oscilando de volta em seguida. Somente o atrito associado à massa e à base pode eventualmente trazer a massa ao descanso. Qualquer sistema de medida de deslocamento responderá a esta oscilação como se uma aceleração real ocorresse. Esta frequência natural é dada por

$$f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

onde f_N = frequência natural em Hz

k = constante de mola em N/m

m = massa sísmica em kg

O atrito que eventualmente traz a massa ao repouso é definido como um coeficiente de amortecimento, que tem como unidade s^{-1} . Em geral, o efeito da oscilação é chamado resposta transiente, descrito por um sinal de período amortecido, como mostrado nas figuras, cuja equação é

$$X_T(t) = X_o e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(2\pi f_N t) \quad (8)$$

onde $X_T(t)$ = posição da massa transiente

X_o = posição de pico, inicial

τ = coeficiente de amortecimento

f_N = frequência natural

Os parâmetros, frequência natural, e coeficiente de amortecimento na equação acima têm um efeito profundo na aplicação de acelerômetros.

Efeitos da Vibração

O efeito da frequência natural e amortecimento no comportamento de acelerômetros massa-mola é melhor descrito em termos de uma vibração forçada. Se o sistema massa-mola (figura 7) é exposto a uma vibração, então a aceleração resultante da base é dada pela próxima equação

$$a(t) = -\omega^2 x_o \sin \omega t$$

Se isto é usado na equação (5), nós podemos mostrar que o movimento da massa é dado por

$$\Delta x = -\frac{m x_o}{k} \omega^2 \sin \omega t \quad (9)$$

onde todos os termos foram previamente mostrados e $\omega = 2\pi f$, com a frequência aplicada.

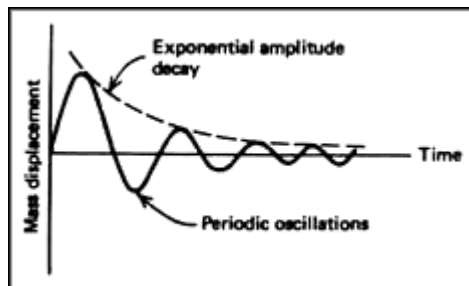


Figura 6 – Um sistema massa mola exibe uma oscilação natural com amortecimento como resposta a um impulso de entrada.

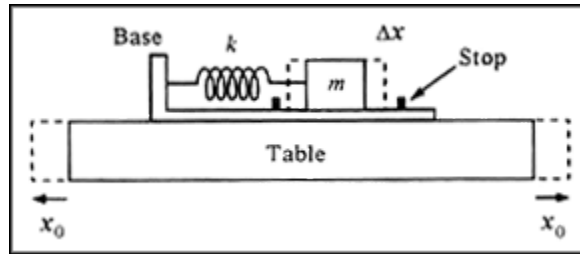


Figura 7 – Um acelerômetro massa-mola foi anexado a uma mesa que exibe vibração. O pico de movimento é X_0 e o movimento da massa é Dx .

Para esclarecer as previsões da equação (9), considera-se a situação apresentada na figura. O acelerômetro massa-mola foi fixo a uma mesa que está vibrando. O X_0 na equação (9) é o pico de amplitude da vibração da mesa, e Dx é a vibração da massa sísmica com o acelerômetro. Assim, a equação (9) prediz que o pico de amplitude da vibração da massa sísmica varia com o quadrado da frequência de vibração, mas linearmente com a amplitude de vibração da mesa. Entretanto, este resultado foi obtido sem consideração da vibração natural do sistema massa-mola. Quando isto é levado em conta, algo bem diferente ocorre.

Para frequências bem acima da frequência natural, o movimento da massa é proporcional ao movimento de pico da mesa, X_0 , mas não à frequência. Assim, tornou-se um sensor de deslocamento. Para resumir:

1. $f < f_N$ – Para uma frequência aplicada menor que a frequência natural, a frequência natural tem pouco efeito na resposta da massa-mola básica dada pelas equações 5 e 9. Uma regra geral afirma que uma frequência aplicada máxima segura é $f < 1/2,5 f_N$.
2. $f > f_N$ – Para uma frequência aplicada muito maior que a frequência natural, a saída do acelerômetro é independente da frequência aplicada. Como mostrado na figura a seguir, o acelerômetro torna-se um medidor de deslocamento x_0 da vibração de equação $x(t) = x_0 \cdot \sin \omega t$ sob estas circunstâncias. ... interessante notar que a massa sísmica é estacionária no espaço neste caso, e a alocação, que é guiada pela vibração, move-se ao redor da massa. Uma regra geral diz que $f > 2,5 f_N$ para este caso.

Geralmente, acelerômetros não são usados próximos de sua frequência natural devido às altas não-linearidades na saída.

Aplicações de sensores de movimento

Algumas notas sobre a aplicação de acelerômetros ajudarão a entender como a seleção de um sensor é feita em um caso particular.

Tipos de Medições:

- Aceleração em modo contínuo

- Vibração
- Choque

Aceleração em modo contínuo

Em acelerações em modo contínuo, está-se interessado na medida de aceleração que pode variar em tempo, mas é não periódica. Assim, o movimento de “stop and go” de um automóvel é um exemplo de uma aceleração em modo contínuo. Para estas acelerações de modo contínuo, seleciona-se um sensor tendo (1) faixa de operação adequada para cobrir as magnitudes de aceleração esperadas e (2) frequência natural suficientemente alta para que seu período seja menor que o espaço de tempo característico sobre as mudanças de aceleração medidas. Usando integradores eletrônicos, o acelerômetro básico pode fornecer ambas informações sobre velocidade (primeira integração) e posição (segunda integração).

Vibração

A aplicação de acelerômetros para vibração primeiro requer que a frequência aplicada seja menor que a frequência natural do acelerômetro. Segundo, deve-se estar seguro que a faixa de aceleração medida fixada nunca excederá o especificado para o dispositivo. Esta certeza deve vir de uma consideração da equação (9) sob as circunstâncias de máxima frequência e amplitude de vibração.

Choque

Os elementos primários de importância em medições de choque são se o dispositivo tem uma frequência natural maior que 1 KHz e uma faixa de operação tipicamente maior que 500 g. O acelerômetro primário que pode satisfazer estas condições é o acelerômetro piezoelétrico.

Tipos de Acelerômetros

A variedade de acelerômetros usados resulta de aplicações com requisitos diferentes de faixa de operação, frequência natural, e amortecimento. Nesta seção, vários acelerômetros com suas características especiais são revisados. A diferença básica está no método de medição do deslocamento da massa. Em geral, as folhas de especificação para um acelerômetro darão a frequência natural, coeficiente de amortecimento, e um fator de escala que relaciona a saída a uma entrada de aceleração. Os valores de massa de test e constante de mola são raramente conhecidos ou requisitados.

Tipos Apresentados:

- Potenciométrico
- LVDT
- Relutância Variável
- Piezoelétrico
- Capacitivos

Potenciométrico

Este é o tipo mais simples de acelerômetro que mede movimento da massa anexando a massa-mola ao braço de contato de um potenciômetro. Desta maneira, a posição da massa é carregada como uma mudança na resistência. A frequência natural destes dispositivos é geralmente menor que 30 Hz, limitando sua aplicação a acelerações de modo contínuo ou medição de vibração de baixas frequências. Numerosos esquemas de condicionamento de sinal são empregados para converter a variação da resistência em um sinal de corrente ou tensão

LVDT

Um segundo tipo de acelerômetro toma vantagem da medição do deslocamento linear natural do LVDT para medir deslocamento de massa. Nestes instrumentos, o próprio núcleo do LVDT é a massa sísmica. Deslocamentos do núcleo são convertidos diretamente em uma tensão AC linearmente proporcional. Estes acelerômetros geralmente têm uma frequência natural menor que 80 Hz e são comumente usados para modo contínuo e vibração de baixa frequência. Figura 27 mostra a estrutura básica de tal acelerômetro.

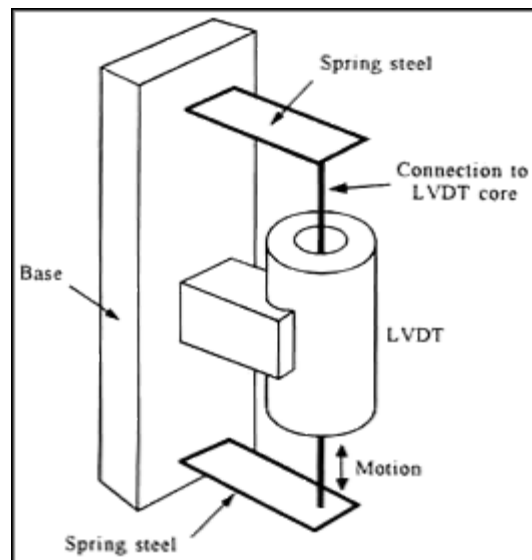


Figura 9 – Um LVDT é geralmente usado como um acelerômetro com o núcleo servindo como a massa

Relutância Variável

Este tipo de acelerômetro cai na mesma categoria geral que o LVDT em que o princípio indutivo é empregado. Aqui, a massa de teste é usualmente um ímã permanente. A medição é feita da tensão induzida numa bobina envoltória assim que a massa magnética se move sob influência da aceleração. Este acelerômetro é usado em estudos de vibração e choque somente, porque tem uma saída somente quando a massa está em movimento. Sua frequência natural é tipicamente menor que 100 Hz. Este tipo de acelerômetro geralmente é usado em exploração de óleo para captar vibrações refletidas de extrato de rocha subterrânea. Desta forma, é comum ser chamado de Geofone.

Piezoelétrico

O acelerômetro piezoelétrico é baseado em uma propriedade exibida por certos cristais em que uma tensão é gerada pelo cristal quando deformado. Esta propriedade é também a base para tal família de sensores como conjuntos fonográficos de cristais e microfones de cristal. Para acelerômetros, o princípio é mostrado na figura 28. Aqui um cristal piezoelétrico é comprimido com uma massa de teste em contato com o cristal. Quando exposto a uma aceleração, a massa de teste tensiona o cristal por uma força ($F = ma$), resultando em uma tensão gerada pelo cristal. Uma medida de tensão é então uma medida de aceleração. O cristal por si é uma fonte de alta impedância, e assim requer um detector de alta impedância de entrada e baixo ruído. Níveis de saída são tipicamente na faixa de milivolt. A frequência natural destes dispositivos pode exceder 5 kHz, então eles podem ser usados para medições de vibração e choque.

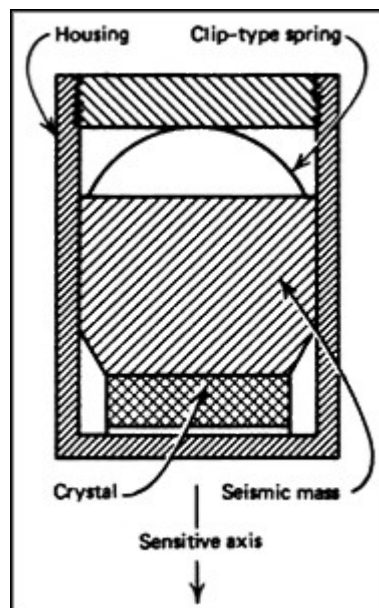


Figura 10 – Um acelerômetro piezoelétrico possui uma frequência natural bastante alta

Capacitivos

Um exemplo típico de acelerômetros capacitivos é o ADXL50. O ADXL50 da Analog Devices é um acelerômetro micro-fabricado stand-alone que consiste de um sistema massa-mola bem como um sistema para medir deslocamento e um circuito de condicionamento de sinal apropriado. A massa é uma barra de silício, e o sistema de mola é implementado pelas quatro restrições que se unem a cada canto da massa. Elas respondem a acelerações que ocorrem na linha com o comprimento da massa. Quando uma aceleração ocorre, a massa move-se com respeito às terminações ancoradas das restrições. Falando grosseiramente, a aceleração é proporcional ao deslocamento da massa. Isto não é bem verdade neste caso desde que o sistema de mola não é de mola ideal como apresentado anteriormente. Este fato é compensado por alguns circuitos condicionadores de sinal mais sofisticados presentes no dispositivo.

O próximo problema que necessita ser resolvido é a medição do deslocamento da barra. O princípio em que é baseado é a capacitância elétrica. Capacitores são componentes elétricos que armazenam carga elétrica. Um capacitor simples é formado pelo posicionamento de duas placas de metal em paralelo entre si como mostrado na figura 10. A quantidade de capacitância que um dispositivo como este exibiria é dada por $C = k / x_0$, onde k é uma propriedade do material entre as duas placas. Usando isto, se k é conhecido e pode-se medir capacitância, eles serão aptos a determinar a distância entre as placas.

O ADXL50 leva esta técnica adiante um passo a mais e usa dois capacitores configurados como na figura 11. Se o dispositivo está em descanso, o espaço entre cada uma das placas é x_0 , então cada um dos capacitores exibe uma capacitância de $C = k / x_0$. Se a placa do meio move-se por uma distância x , então isto resulta em:

$$C_a = \frac{k}{x + x_0}$$
$$C_b = \frac{k}{x - x_0}$$

Isto pode ser escrito como

$$C_a = C \left(\frac{x_0}{x + x_0} \right)$$
$$C_b = C \left(\frac{x_0}{x - x_0} \right)$$

O ADXL50 mede a diferença entre os dois capacitores que é dada por:

$$\Delta C = C_a - C_b = Cx_0 \left[\left(\frac{1}{x + x_0} \right) - \left(\frac{1}{x - x_0} \right) \right] = \frac{-2x}{x^2 - x_0^2}$$

Para pequenos valores de deslocamento x , a expressão acima é reduzida a:

$$\Delta C = \frac{-2}{x_0^2}$$

Portanto a diferença na capacitância é proporcional a x , mas somente para valores pequenos de deslocamento. O ADXL50 usa um loop de controle de resposta negativo para certificar-se que um movimento da massa é mantido pequeno para que a expressão acima permaneça correta.

Os acelerômetros para ativação de Air Bag são, atualmente, na sua maioria capacitivos e microfabricados (surface micromachining), uma tecnologia que será explicada a seguir.

Microfabricação

A maioria dos projetos de acelerômetros microfabricados passivos sendo manufaturados no presente, a constante de mola corresponde à rigidez de uma barra (ou barras) de silício e o coeficiente de amortecimento corresponde ao efeito do filme comprimido em intervalos entre a massa de prova e estrutura de suporte.

As estruturas são feitas de polisilício e usam um óxido de sacrifício (SiO_2) como “molde”. Técnicas de fotolitografia de circuitos integrados padrões são usadas para depositar uma camada moldada de SiO_2 . Isto é seguido por uma camada moldada de polisilício estrutural. A estrutura é então passada por uma solução que remove a camada de sacrifício deixando uma estrutura de polisilício que se mantém livre. A estrutura fica tipicamente 1,6µm acima da superfície da bolacha, com tamanhos característicos laterais da mesma ordem. Devido ao uso de técnicas de circuito integrado padrão, o processo integra-se bem com processo de fabricação de bolacha padrão. Isto permite a consistência e repetibilidade na produção de grandes quantidades a baixo custo.

O pequeno tamanho característico de estruturas microfabricadas torna-se econômico para aplicações em circuitos e sensores no mesmo local. Isto contrasta com outras tecnologias de microfabricação, tal como microfabricação de substrato, que são fundamentalmente limitadas no tamanho. Microfabricação de substrato é o processo de escolha para construir sensores de pressão. Diafragmas podem ser construídos facilmente e a pressão física é aplicada à traseira do silício, facilitando o problema de conectar o sensor ao mundo externo. Entretanto, sensores em movimento e estruturas ressonantes, estruturas mais complicadas são projetadas e microfabricação de substrato encontra seus limites. Microfabricação de substrato usa um banho anisotrópico para cortar uma bolacha de silício ou quartzo para criar estruturas. O tamanho característico das estruturas é definido pela espessura da bolacha e o ângulo de banho. Processos como junção de bolacha podem ser usados para reduzir espessura da bolacha, mas até mesmo este avanço, as dimensões de sensores acelerômetros tipicamente atingem 10 mm², enquanto estruturas microfabricadas de superfície típicas são 10 vezes menores (<1 mm²). Para atingir integração, um sensor de substrato tipicamente necessitará combinar-se com um circuito integrado separado para condicionamento de sinal e então montado como híbrido. Microfabricação de superfície pode implementar um sensor, completo com todos os condicionamentos de sinal necessário

no mesmo tamanho que um sensor de substrato sozinho. O desenvolvimento de um processo CMOS de 1 um conhecido como iMEMS permitirá mesmo grandes inovações na integração que irá incluir processadores EPROM em um único chip com um sensor microfabricado.

2. Modelos Comercialmente Disponíveis

Silicon Designs

Geral

Silicon Designs, Inc. (SDI) desenvolveu uma tecnologia de acelerômetro miniatura que combina micro-fabricação e tecnologia de circuito integrado para produzir um sensor de aceleração capacitivo altamente confiável. No enfoque da SDI de construção de sensores baseados na utilização de níquel é um dos primeiros sucessos comerciais de MEMS (Micro-ElectroMechanical Systems) que não sejam de silício. Este projeto básico encontrou aplicações nos anos 1990 em mercados incluindo módulos de controle avançados de air bag de controle simples assim como testes comerciais e industriais e aeroespaciais. Desde o desenvolvimento inicial, sua pesquisa contínua resultou em melhorias que aumentaram a confiabilidade, sensibilidade e sobrevivência de nossos acelerômetros a um ponto que eles estão sendo usados em áreas inteiramente novas tais como navegação inercial e ambientes de altas temperaturas.

Sua tecnologia de sensores atual permite a criação de acelerômetros com uma sensibilidade de escala total de menos de 1 g a mais de 20000 g. Sobre nossa escala padrão (2 a 1000g), a maioria dos acelerômetros continua em especificação de operação depois de sustentada exposição a 10000 g e exposição a temperaturas acima de 200°C.

Aplicações atuais

Automotiva – Teste, suspensão, air bags

Agricultura – Choque e vibração em coleta, monitoramento de linha de produção

Manufatura – Teste, monitoramento da linha de produção, monitoramento de embarque

Transporte – sentimento de aquaplanagem, monitoramento de embarque, teste

Decida em profundidades – Sensor de falha / Altitude. Saúde da máquina

NASA – Monitoramento de vibração, teste

Militar – Teste de lançamento e impacto, controle de vôo, navegação inercial, segurança e armas, sensor de altitude, detecção de impacto

Detalhes

Acelerômetros da Silicon Designs usam mudança de capacitância devida a força de aceleração como parâmetro de sensoreamento. Uma aproximação capacitiva permite vários benefícios quando comparada com sensores piezoresistivos usados em muitos outros acelerômetros. Em geral, capacitores dielétricos gasosos são relativamente insensíveis a temperatura. Embora espaços mudem com temperatura devido a expansão térmica, o baixo coeficiente de expansão térmico de muitos materiais pode produzir um coeficiente térmico de capacitância mais ou menos 2 vezes a menos em magnitude que o coeficiente térmico de

resistividade de silício dopado. Sensores capacitivos portanto possuem o potencial de fornecer uma faixa maior de temperaturas de operação, sem compensação, do que sensores piezoresistivos. Como comparado com acelerômetros do tipo piezoelétricos requerem uma entrada dinâmica de alguma frequência mínima para gerar uma resposta, e o sensoreamento capacitivo permite respostas para acelerações DC bem como vibrações dinâmicas. Isto permite ao acelerômetro capacitivo ser usado em uma larga faixa de aplicações.

A unidade básica do acelerômetro da Silicon Designs é uma embalagem LCC 20 pin contendo duas partes: o Elemento Sensor ou chip sensor e uma eletrônica integrada ou chip ASIC (veja figura abaixo). Os chips estão anexados usando base de fixação normalizada e junção de fios de ouro e a embalagem é vendida selada para fornecer um dispositivo simples, rígido e completamente hermético. Construído com um dos dois chips ASIC para fornecer ambas saídas digital e analógica, este acelerômetro básico pode ser facilmente montado na superfície de uma placa de circuito e é usado para construir todos os módulos SDI de eixos simples ou triplos.

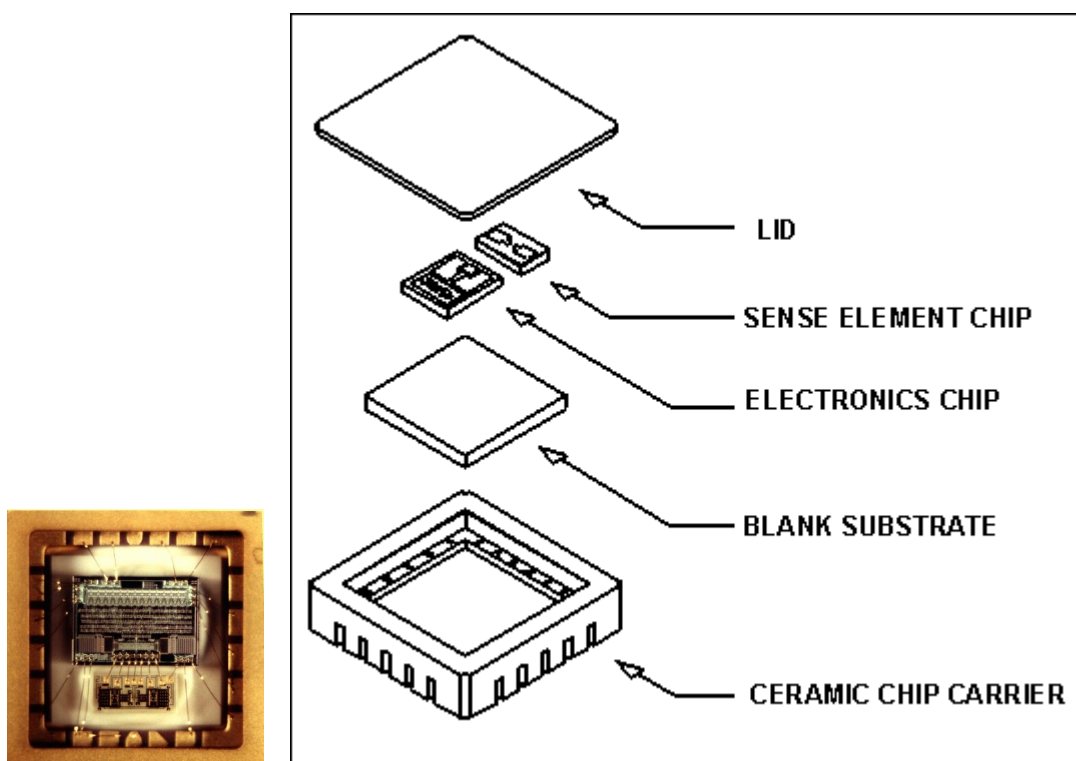


Figura 11 – Encapsulamento do elemento sensor (foto e esquema)

Elementos sensores micro-fabricados

A estrutura básica do elemento sensor SDI é mostrada abaixo. O elemento sensor livre é uma placa plana de níquel suportada acima da superfície do substrato por duas barras de torsão anexadas a um pedestal central. A estrutura é formada assimetricamente para que um lado seja mais pesado que o outro, resultando em um centro de massa que é deslocado do eixo das barras de torsão. Quando uma força de aceleração produz um momento ao redor do eixo das barras de torsão, a placa ou asa é livre para rodar, restringida apenas pela constante de mola das barras de torsão.

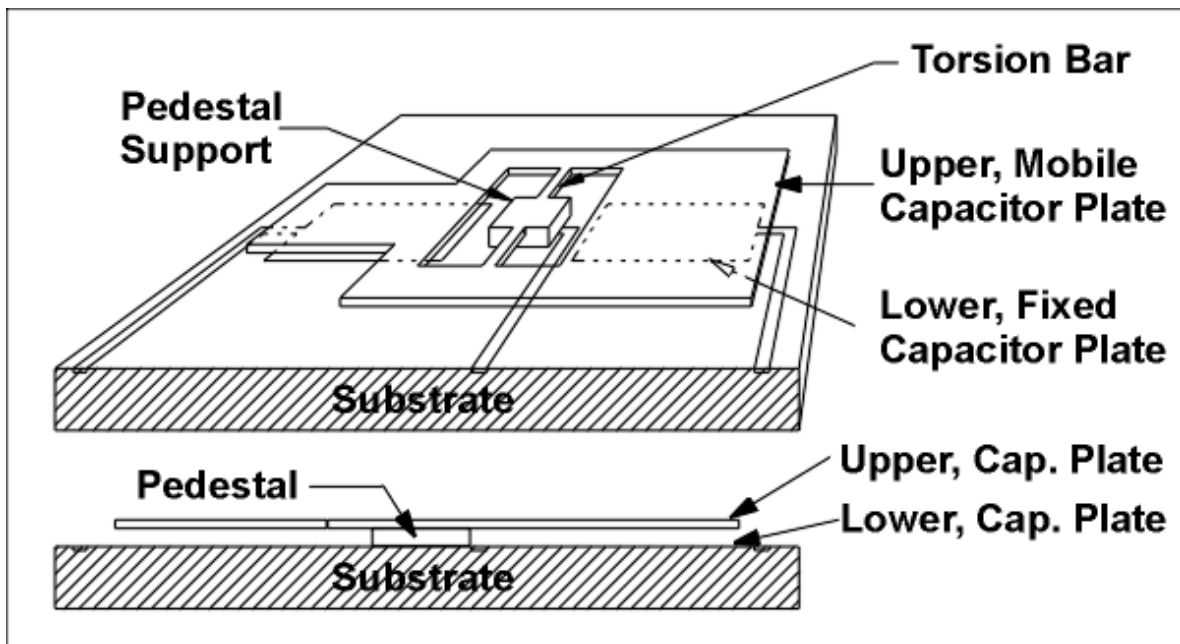


Figura 12 – Estrutura básica do elemento sensor SDI

Na superfície do substrato, em baixo da asa do elemento sensor, duas placas capacitivas condutivas são localizadas assimetricamente em cada lado do eixo da barra de torção. A asa superior e a placa do capacitor inferior no substrato formam dois capacitores de intervalos de ar variável com conexão comum. Isto cria uma ponte capacitiva completamente ativa. Quando a asa rotaciona em torno do eixo da barra de torção, a distância média entre a asa e uma superfície da placa diminui, aumentando a capacitância para aquela placa, enquanto a distância para a outra placa aumenta, diminuindo sua capacitância. Este projeto básico foi produzido em uma variedade de materiais. Sob concessão de licença, Ford Motor Company fabricou acelerômetros baseados neste projeto usando técnicas normais de processamento de silício. Entretanto, o uso de materiais como metais eletroformados permite melhor controle sobre a geometria e maior sensibilidade que o substrato de silício. Silicon Design's construiu seus elementos sensores em níquel e suas ligas devido a facilidade com que estes podem ser eletroformados, assim como dureza e densidade.

As asas do elemento sensor possuem aproximadamente 100 microns de comprimento por 600 microns de largura e 5 a 10 microns de espessura. O espaço entre a asa e o substrato é aproximadamente 5 microns resulta em uma capacitância da asa para cada placa inferior de mais ou menos 0,15 pF. A sensibilidade dos elementos sensores (a taxa de deflexão da aceleração) é determinada pela massa do elemento sensor, a distância do centro de massa para o eixo da barra de torção, e a rigidez da barra de torção. Limites mecânicos podem ser adicionados nos quatro cantos externos de cada asa do elemento sensor para fornecer proteção adicional à sobre-tensão das barras de torção sob condições de alto choque. Cada chip de elemento sensor completo contém duas asas para um total de quatro capacitores sensores.

Fabricação do Elemento Sensor

Fabricação de estruturas de superfície usando eletroformação seletiva é diferente de métodos tradicionais para construir dispositivos MEMS em substrato de silício. Nesta técnica, um metal é eletroformado sobre um substrato condutivo através de uma camada de foto resiste moldada. Depois que o foto resiste foi retirado, o metal permanece na superfície em um modelo determinado pelas áreas abertas do foto resiste. Para produzir elementos sensores suspensos, a estrutura é fabricada parcialmente no topo de um material espaçador de sacrifício previamente depositado. Depois que os elementos sensores foram formados, o material espaçador é removido, deixando o elemento sensor suportado apenas onde ele foi formado diretamente na superfície. O uso de tais técnicas aditivas, como oposto às limitações do banho seletivo do processo de silício, permite produzir estruturas mais complexas com um potencial para vácuos parcialmente enclausurados ou estruturas complexas de várias camadas. Em adição, com recentes avanços em tecnologias de foto resiste, paredes com alta razão de aspecto podem ser criadas com facilidade.

A produção de sensor da Silicon Designs é conduzida com substratos de silício de quatro polegadas utilizando técnicas normais de processamento de foto resiste, alinhadores de contato UV e equipamento de eletroformação construído personalizado. Uma bolacha sozinha suporta aproximadamente 1600 elementos sensores individuais, e é testada e cortada in house para completar o processamento.

Chips Eletrônicos

O segundo componente chave neste projeto é o ASIC (Application Specific Integrated Circuit) que é necessário para converter as pequenas mudanças de capacitâncias do elemento sensor em um sinal elétrico útil. Estas eletrônicas devem ser acopladas fortemente ao elemento sensor para medir corretamente as minúsculas mudanças na capacitância causadas pela aceleração que ocorrem na presença de capacitâncias maiores extraviadas. Silicon Designs desenvolveu duas versões deste ASIC; um fornece uma saída digital e o outro fornece uma saída analógica. O ASIC digital gera uma corrente de pulsos cuja frequência (ou mais precisamente densidade de pulso) é proporcional à aceleração. O ASIC analógico gera uma tensão diferencial na saída proporcional à aceleração.

Tendo ambos acelerômetros analógico e digital aumenta o número de aplicações que podem tomar vantagem de nossa tecnologia única de elementos sensores. A maioria dos equipamentos de teste e dos sistemas de acelerômetros antigos é baseada em sensores analógicos. Isto torna fácil muda-los para um acelerômetro SDI de mais alto desempenho (analog 1210) sem grandes trabalhos de re-projeto e permite o uso de técnicas de processamento de sinal analógico familiares. A disponibilidade de um acelerômetro digital (digital 1010) permite fácil integração com sistemas baseados em microprocessadores modernos sem o problema de conversão A/D. Um microprocessador simples, tal como um da série Microchip PIC, é tudo que se precisa para ler a saída do acelerômetro.

O modelo 1210 – Acelerômetro digital

- Sensor:
 - Microfabricado Capacitivo
 - Amortecimento com Nitrogênio

- Hermeticamente selado
- Saída diferencial +/- 4V ou saída final única de 0,05 a 4,5 V
- Completamente calibrado
- Responde a acelerações DC e AC
- Operação de -55 a +125°C
- Alimentação +5 VDC, 7 mA (típica)
- Faixas de g não padrões disponíveis
- Sensor e amplificador integrados
- Gabinetes de montagem de superfície J-Lead ou LCC
- Seriado para rastreabilidade

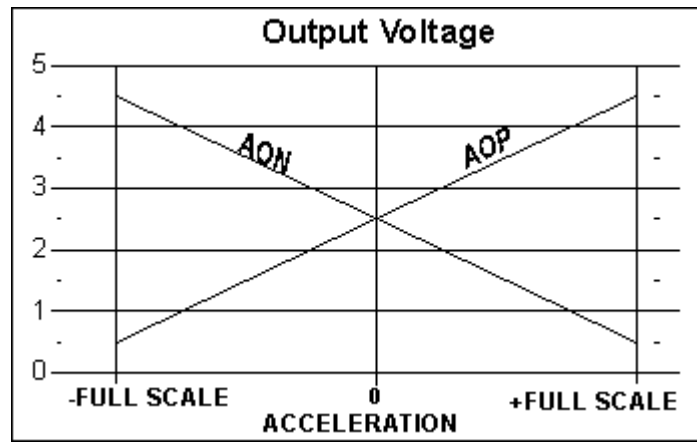


Figura 13 – Saída de Tensão

Tabela 2– Desempenho do 1210 da Silicon Designs

PERFORMANCE - by Model: Unless otherwise specified $V_{DD}=V_R=5.0$ VDC, $T_C=25$ °C, Differential Mode.

MODEL NUMBER	1210x-005	1210x-010	1210x-025	1210x-050	1210x-100	1210x-200	1210x-200	UNITS
Input Range	± 5	± 10	± 25	± 50	± 100	± 200	± 400	g
Frequency Response (Nominal, 3 dB)	0 - 400	0 - 600	0 - 1000	0 - 1500	0 - 2000	0 - 2500	0 - 3500	Hz
Sensitivity (Differential) ¹	800	400	160	80	40	20	10	mV/G
Output Noise (RMS, typical)	32	63	158	316	632	1265	2530	ug/(rootHz)
Max. Mechanical Shock (0.1 ms)	2000							g

Note 1: Single ended sensitivity is half of values shown

PERFORMANCE - all Models: Unless otherwise specified $V_{DD}=V_R=5.0$ VDC, $T_C=25$ °C, Differential Mode.

PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNITS
Cross Axis Sensitivity		2	3	%
Bias Calibration Error ²	-005	2	4	% of Span
	-010 thru -400	1	2	

Bias Temperature Shift (T _C = -55 to +125 °C) ²	-005		100	300	(ppm of Span)/°C
	-010 thru -400		50	200	
Scale Factor Calibration Error ^{2,3}			1	2	%
Scale Factor Temp. Shift (T _C = -55 to +125 °C) ²			+300		ppm/°C
Non-Linearity (-90 to +90% of Full Scale) ^{2,3}			0.5	1.0	% of Span
Power Supply Rejection Ratio			25		dB
Output Impedance			90		Ohms
Operating Voltage	4.75	5.0	5.25		Volts
Operating Current (I _{DD} + I _{VR}) ²		7	10		mA
Mass: "L" Package (add .06 grams for "J" Package)		0.62			grams

Note 2: Tighter tolerances available on special order.

Note 3: 100g and greater versions are tested from -65 to +65 g.

Analog Devices

O acelerômetro ADXL50 da Analog Devices, introduzido em 1991 e em produção em volume desde 1993, distingue-se como o primeiro dispositivo disponível comercialmente empregando microfabricação de superfície. Outras características em que foi pioneiro:

- O primeiro acelerômetro microfabricado de superfície a ser manufaturado em altos volumes.
- O primeiro sensor microfabricado com o elemento sensor de movimento, circuito de condicionamento de sinal extensivo e circuito de auto-teste em um único chip.
- O primeiro IC sensor microfabricado cuja parte move-se no plano do chip.
- O primeiro sensor microfabricado de superfície
- O primeiro sensor acelerômetro microfabricado deste tamanho

Fabricação e Funcionamento

Analog Devices produzia o ADXL-50, um acelerômetro +/- 50 g para acionamento de air bag, que foi um dos dispositivos microfabricados mais publicados até o momento. O dispositivo, embalado numa embalagem de IC normalizada TO-100, contém um polisilício microfabricado de estrutura armada suspensa e um circuito condicionador de sinal chip on completo BiMOS. Como ilustrado abaixo, uma massa de prova móvel em polisilício de 2 µm de espessura com placa capacitadora central com um número grande de dedos de silício de aproximadamente 100 µm é posicionado tal que os dedos são alocados entre conjuntos alternados de dedos fixos num espaçamento de 1 µm (com a estrutura mantida 1 µm acima do substrato). Cada dois conjuntos de dedos fixos formam coletivamente a placa do capacitor. A medição da capacitância usada para sentir o deslocamento da massa de prova é dedida diferencial entre os dedos da massa de prova e ambos os conjuntos de dedos fixos. Se a massa de prova está centrada, as duas capacitâncias são iguais. Qualquer deslocamento fora do centro causa uma capacitância aumentar enquanto outra aumenta.

A diferença de capacitâncias é medida aplicando um de dois complementares (180° fora de fase) ondas quadradas de 1 MHz para cada das placas fixas e medindo a voltagem na placa da massa de prova. Se as duas capacitâncias são iguais, a tensão medida deveria ser teoricamente zero. Um amplificador em chip amplifica esta tensão e então demodula para remover qualquer componente residual da transportadora 1MHz. A tensão DC resultante é

amplificada mais e usada como um sinal de resposta, através de um resistor de 3M Ω , aplicada à placa da massa de prova ao invés de mantê-lo centrado eletrostaticamente. As duas placas fixas são mantidas a níveis de 0,2 e 3,4 V DC, respectivamente, e estes são os potenciais contra o que a tensão de resposta age. A massa de prova é mantida a 1,8 V, no meio entre estas duas tensões, se nenhuma aceleração age nela. Assim, quando está ligado, a massa de prova é mantida no centro entre as duas placas fixas, e a tensão requerida para mantê-la lá pela resposta é usada como o sinal de saída de aceleração. Devido ao alto ganho no circuito de resposta, a massa de prova geralmente não se move mais que aproximadamente 10 nm.

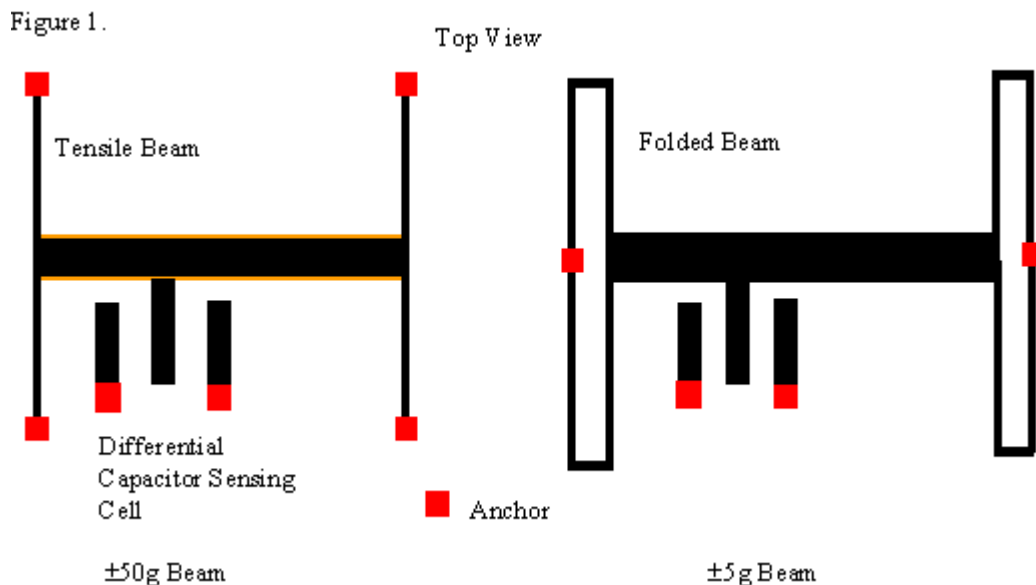


Figura 13 – Modelo esquemático do acelerômetro ADXL50 (+/-50 g e +/-5 g)

O chip inteiro tem 3 x 3 mm de tamanho, com a superfície microfabricada tomando uma região até aproximadamente 0,6 mm² (aprox. 7%) e o resistor de 3 Mohm usando aprox 0,4 mm² (aprox. 4%). O resposta do sistema todo é DC a 10kHz, com um ruído típico a 6,6mg/SqHz de densidade (aprox. 0,7 g RMS para operação de banda toda, embora a largura da banda é tipicamente reduzida usando componentes filtros externos na prática). O próprio sistema mecânico (circuito aberto)tem uma ressonância de aprox. 24 kHz, com um Q de 3 a 4. Uma versão de maior sensibilidade, o ADXL-05 tem um sistema de ola mecânico aliviador, para uma freqüência de ressonância de aprox. 12kHz, o mesmo Q, e um ruído típico de densidade de 0,5 mg/SqHz.

Desenvolvimento do ADXL-50 requereu a fusão do processo de microfabricação de silício com o processo BiCMOS análogo de 4 μ m, e isto certamente não foi trivial. Uma vez feito, entretanto, o volume de produção foi sub estimado, e este projeto (assim como seus descendentes) está disponível como um comódit. Em versões mais novas, o ruído destes dispositivos foi consideravelmente diminuído.

Corrosão profunda com íon reativo com cavidade enterrada, bolachas unidas por fusão também foram usada para formar acelerômetros capacitivos balanceados a força com taxas

de alto aspecto. Variedades de tipos dedos armados foram banhados em bolachas de silício superiores, com a parada do banho no dióxido de silício na interface de união ou no nas cavidades pré banhadas na interface. Uma massa de prova suspensa poderia mover os dedos capacitivos relativamente aos dedos fixos em atuações separadas e rengiões sensoras (a vista superior destas estruturas é similar aos dispositivos dirigidos pela armação eletrostáticas como o acelerômetro ADXL-50 discutido acima). A alta razão de aspecto atingível com esta aproximação (aprox 25) permite para alta rigidez de eixo fora, altas capacitâncias (aprox. 3 pF) e uma massa de prova relativamente pesada (43Mg) para ruído térmico aumentado sobre o projeto da superfície microfabricada. Um circuito de controle CMOS separado foi usado, incluindo um oscilador, detector de fase, integrado, mudador de fase, e amplificadores de saída. Medidas de desempenho do sistema de dois chips mostraram uma largura de banda de 1 kHz, uma sensibilidade de 700 mV/g, uma amplitude dinâmica de 44 dB (correspondente a uma resolução de 35 mg para um dispositivo de escala total de 5 g ou 7 mg para um dispositivo de escala total de 7 mg). Desde que o ruído eletrônico é dominante, o ruído estimado de fundo com o circuito melhorado foi para a faixa sub-mg.

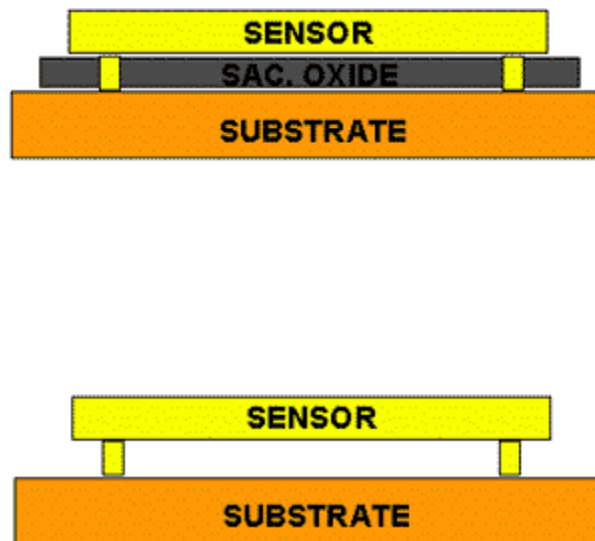


Figura 14 – Esquema do processo de microfabricação de superfície

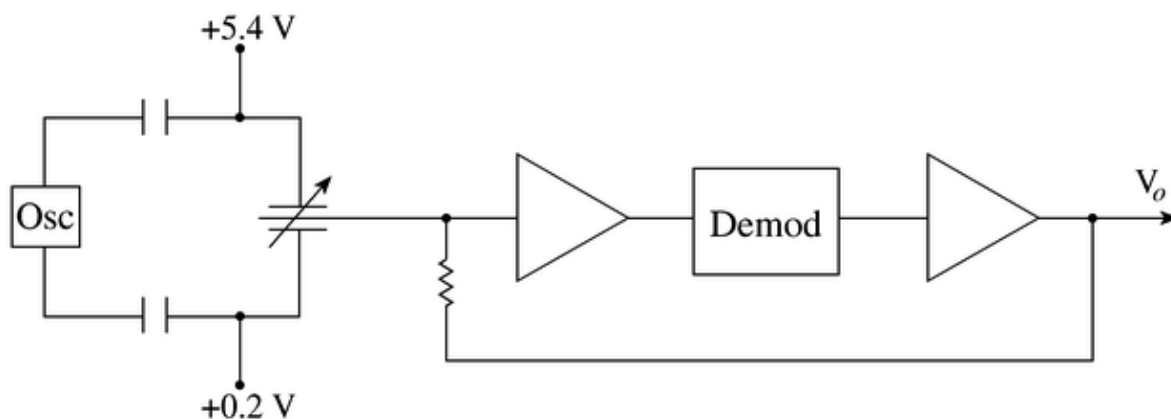


Figura 15 – Diagrama de bloco do ADXL50

Tabela 3 – Modelos de Acelerômetros e Aplicações da Analog Devices

Accelerometer Product Family

Last Updated: 8/2003

Generic Part #	Description	G Range	Axes	Resolution	Bandwidth	Voltage	Power	Package
ADXL103	High precision, high stability single axis 1.5g accelerometer, with analog output	±1.5g	X	2mg	2kHz	3-6V	0.7mA	SMT
ADXL203	High precision, high stability dual axis 1.5g accelerometer, with analog outputs	±1.5g	X,Y	2mg	2kHz	3-6V	0.7mA	SMT
ADXL311	Low-cost, dual axis +/-2g, with analog outputs	+/-2g	X,Y	5mg	6kHz	2.7-5V	0.4mA	SMT
ADXL202E	XL202 2 axis 2g in ultra small package	±2g	X,Y	5mg	6kHz	2.7-5V	0.5mA	SMT
ADXL210E	ADXL210 2 axis 10g in ultra small package	±10g	X,Y	10mg	6kHz	3-5V	0.6mA	SMT
ADXL250	Dual Axis High Resolution 50g Accelerometer	±50g	X,Y	10mg	1kHz	4V-5V	3.5mA	SMT
ADXL150	Single Axis High Resolution 50g Accelerometer	±50g	X	10mg	1kHz	4V-5V	1.8mA	SMT
ADXL190	Single Axis 100g Accelerometer	±100g	X	40mg	400Hz	5V	1.8mA	SMT
ADXL202**	Low power dual axis 2g with digital output	±2g	X,Y	5mg	6kHz	2.7-5V	0.5mA	SMT
ADXL105**	Precision ±5g Improved Replacement For XL05	±5g	X	2mg	10kHz	2.7-5V	2mA	SMT
ADXL210**	Low power dual axis 10g, digital output	±10g	X,Y	10mg	6kHz	2.7-5V	0.5mA	SMT
ADXL50*	50g Force Balance Accelerometer	±50g	X	50mg	4kHz	5V	10mA	T0-100

* Obsolete. Please see product page for suggested replacement parts.

** Not recommended for new designs.

O ADXL50

Características

Sistema de Medição de Aceleração Completo em um único IC Monolítico

Faixa de Medição de escala completa: +/- 50 g

Auto teste em comando digital

Operação com fonte única de +5 V

Sensibilidade Pré-calibrada a 19 mV/g

Amplificador Buffer interno para uso de sensibilidade ajustável e nível de g zero.

Resposta em frequência: DC a 10 kHz

Filtro posterior com componentes externos passivos
Sobrevivência a altos choques: >2000g sem alimentação
Outras versões disponíveis: ADXL05 (+/-5 g)

Tabela 4 – Especificações do ADXL50
ADXL50—SPECIFICATIONS ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , $T_A = +25^\circ\text{C}$ for J Grade Only, $V_S = +5\text{ V}$, @ Acceleration = 0 g, unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	Min	ADXL50J/A Typ	Max	Units
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Guaranteed Full Scale	-50		+50	g
Nonlinearity	Best Fit Straight Line, 50 g FS		0.2		% of FS
Alignment Error ¹			±1		Degrees
Transverse Sensitivity ²			±2		%
SENSITIVITY					
Initial Sensitivity at V_{PR}	+25°C	16.1	19.0	21.9	mV/g
Temperature Drift ³			0.75/1.0		% of Reading
ZERO g BIAS LEVEL					
Initial Offset	at V_{PR}	1.55/1.60	1.80	2.05/2.00	V
vs. Temperature ³			±15/35		mV
vs. Supply	$V_S = 4.75\text{ V}$ to 5.25 V		10	32	mV/V
NOISE PERFORMANCE					
Voltage Noise Density	at V_{PR}		6.6	12	mg/√Hz
Noise in 100 Hz Bandwidth	BW = 10 Hz to 1 kHz		66		mg rms
Noise in 10 Hz Bandwidth			20		mg rms
FREQUENCY RESPONSE					
3 dB Bandwidth ⁴	$C1 = 0.022\text{ }\mu\text{F}$ (See Figure 22)	800	1300		Hz
3 dB Bandwidth ⁴	$C1 = 0.0068\text{ }\mu\text{F}$		10		kHz
Sensor Resonant Frequency			24		kHz
SELF-TEST INPUT					
Output Change at V_{PR} ⁵	ST Pin from Logic "0" to "1"	-0.85	-1.00	-1.15	V
Logic "1" Voltage		2.0			V
Logic "0" Voltage				0.8	V
Input Resistance	To Common		50		kΩ
+3.4 V REFERENCE					
Output Voltage		3.350	3.400	3.450	V
Output Temperature Drift ³			±10		mV
Power Supply Rejection	DC, $V_S = +4.75\text{ V}$ to $+5.25\text{ V}$		1	10	mV/V
Output Current	Sourcing	500			μA
PREAMPLIFIER OUTPUT					
Voltage Swing	Source or Sink	0.25		$V_S - 1.4$	V
Current Output		30	80		μA
Capacitive Load Drive			100		pF
BUFFER AMPLIFIER					
Input Offset Voltage ⁶	Delta from Nominal 1.800 V		±10	±25	mV
Input Bias Current			5	20	nA
Open-Loop Gain	DC		80		dB
Unity Gain Bandwidth			200		kHz
Output Voltage Swing	$I_{OUT} = \pm 100\text{ }\mu\text{A}$	0.25		$V_S - 0.25$	V
Capacitive Load Drive		1000			pF
Power Supply Rejection	DC, $V_S = +4.75\text{ V}$ to $+5.25\text{ V}$		1	10	mV/V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		4.75		5.25	V
Quiescent Supply Current			10	13	mA
TEMPERATURE RANGE					
Operating Range J		0		+70	°C
Specified Performance A		-40		+85	°C
Automotive Grade*		-40		+125	°C

NOTES

¹Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity. (see Figure 2).

²Transverse sensitivity is measured with an applied acceleration that is 90° from the indicated axis of sensitivity. Transverse sensitivity is specified as the percent of transverse acceleration that appears at the V_{PR} output. This is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensor sensitivity errors. (see Figure 2).

³Specification refers to the maximum change in parameter from its initial at +25°C to its worst case value at T_{MIN} to T_{MAX} .

⁴Frequency at which response is 3 dB down from dc response assuming an exact C1 value is used. Maximum recommended BW is 10 kHz using a 0.007 μF capacitor, refer to Figure 22.

⁵Applying logic high to the self-test input has the effect of applying an acceleration of -52.6 g to the ADXL50.

⁶Input offset voltage is defined as the output voltage differential from 1.800 V when the amplifier is connected as a follower (i.e., Pins 9 and 10 tied together). The voltage at Pin 9 has a temperature drift proportional to that of the 3.4 V reference.

*Contact factory for availability of automotive grade devices.

All min and max specifications are guaranteed. Typical specifications are not tested or guaranteed.
Specifications subject to change without notice.

Tabela 5 – Taxas Limite de Exposição

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Acceleration (Any Axis, Unpowered for 0.5 ms)	2000 g
Acceleration (Any Axis, Powered for 0.5 ms)	500 g
+V _S	-0.3 V to +7.0 V
Output Short Circuit Duration (V _{PR} , V _{OUT} , V _{REF} Terminals to Common)	Indefinite
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C

*Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; the functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Package Characteristics

Package	θ_{JA}	θ_{JC}	Device Weight
10-Pin TO-100	130°C/W	30°C/W	5 Grams

ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range
ADXL50JH	0°C to +70°C
ADXL50AH	-40°C to +85°C

Motorola

MMA3202

A série MMA de acelerômetros microfabricados capacitivos em silício contempla condicionamento de sinal, um filtro passa baixa de 4 polos e compensação de temperatura. Span de escala completa de deslocamento de zero g e conjunto filtro de cut-off e não requer serviços externos. Um sistema completo de auto-teste de capacidade verifica a funcionalidade do sistema.

Características

- Condicionamento de sinal integral
- Saída linear
- Desempenho Ratiometric
- Filtro Bessel de quarta ordem preserva a integridade da forma do pulso
- Auto-teste calibrado
- Detecção de baixa tensão, monitor de clock, e status de cheque de paridade EPROM
- Transdutor Hermeticamente Selado a nível de água para confiança superior
- Design robusto, sobrevivência a altos choques

Aplicações típicas

- Monitoramento de vibração e gravação
- Monitoramento de impacto
- Controle de aplicação
- Monitoramento de mancal mecânico
- Proteção de disco rígido de computador
- Joysticks e mouses de computador
- Dispositivos de entrada de realidade virtual
- Sistemas e dispositivos de diagnósticos de esportes

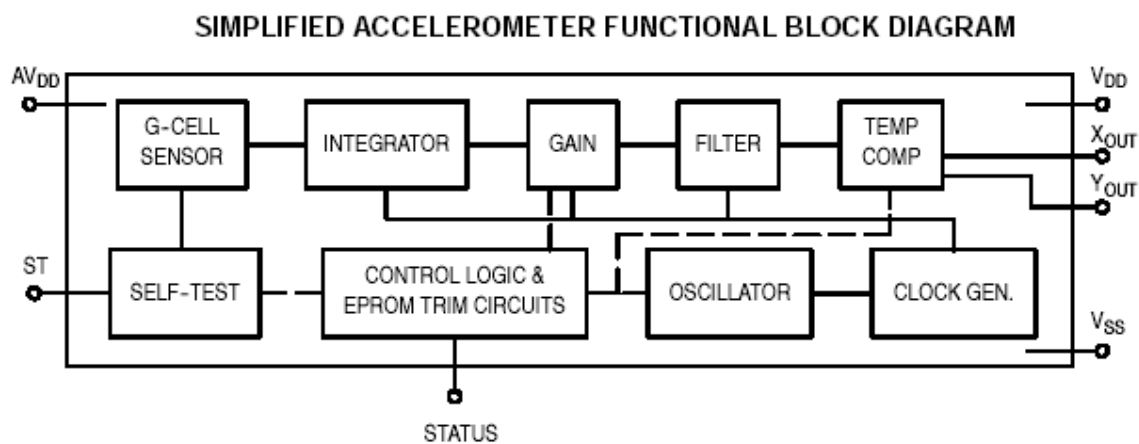


Figura 14– Diagrama de bloco funcional para o MMA3202D

Tabela 6– Taxas limite de exposição

MAXIMUM RATINGS (Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	G_{pd}	± 200	g
Unpowered Acceleration (all axes)	G_{upd}	2000	g
Supply Voltage	V_{DD}	-0.3 to +7.0	V
Drop Test ⁽¹⁾	D_{drop}	1.2	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +105	°C

NOTES:

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

Tabela 7 – Especificações para o MMA3202D

OPERATING CHARACTERISTICS(Unless otherwise noted: $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +105^{\circ}\text{C}$, $4.75 \leq V_{DD} \leq 5.25$, X and Y Channels, Acceleration = 0g, Loaded output⁽¹⁾)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	I_{DD}	6	8	10	mA
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range X-axis	gFS	—	112.5	—	g
*Acceleration Range Y-axis	gFS	—	56.3	—	g
Output Signal					
Zero g ($V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁴⁾	V_{OFF}	2.2	2.5	2.8	V
Zero g	$V_{OFF,V}$	$0.44 V_{DD}$	$0.50 V_{DD}$	$0.56 V_{DD}$	V
Sensitivity X-axis ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁵⁾	S	19	20	21	mV/g
Sensitivity Y-axis ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁵⁾	S	38	40	42	mV/g
Sensitivity X-axis	S_V	3.72	4	4.28	mV/g/V
Sensitivity Y-axis	S_V	7.44	8	8.56	mV/g/V
Bandwidth Response	f_{-3dB}	360	400	440	Hz
Nonlinearity	NL_{OUT}	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (.01-1 kHz)	n_{RMS}	—	—	2.8	mVrms
Power Spectral Density	n_{PSD}	—	110	—	$\mu\text{V}/(\text{Hz}^{1/2})$
Clock Noise (without RC load on output) ⁽⁶⁾	n_{CLK}	—	2.0	—	mVpk
Self-Test					
Output Response	g_{ST}	9.6	12	14.4	g
Input Low	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.3 \times V_{DD}$	V
Input High	V_{IH}	$0.7 \times V_{DD}$	—	V_{DD}	V
Input Loading ⁽⁷⁾	I_{IN}	-30	-110	-300	μA
Response Time ⁽⁸⁾	t_{ST}	—	2.0	—	ms
Status ⁽¹²⁾⁽¹³⁾					
Output Low ($I_{load} = 100\text{ }\mu\text{A}$)	V_{OL}	—	—	0.4	V
Output High ($I_{load} = 100\text{ }\mu\text{A}$)	V_{OH}	$V_{DD} - .8$	—	—	V
Minimum Supply Voltage (LVD Trip)	V_{LVD}	2.7	3.25	4.0	V
Clock Monitor Fail Detection Frequency	f_{min}	50	—	260	kHz
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time ⁽⁹⁾	t_{DELAY}	—	0.2	—	ms
Full Scale Output Range ($I_{OUT} = 200\text{ }\mu\text{A}$)	V_{FSO}	0.3	—	$V_{DD} - 0.3$	V
Capacitive Load Drive ⁽¹⁰⁾	C_L	—	—	100	pF
Output Impedance	Z_O	—	300	—	Ω
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity ⁽¹¹⁾	$V_{ZX,YX}$	—	—	5.0	% FSO
Package Resonance	f_{PKG}	—	10	—	kHz

NOTES:

1. For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 k Ω resistor and a 0.01 μF capacitor to ground.
2. These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
3. Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
4. The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{DD}/2$ and for negative acceleration the output will decrease below $V_{DD}/2$.
5. The device is calibrated at 20g.
6. At clock frequency $\approx 70\text{ kHz}$.
7. The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
8. Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
9. Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causing them to saturate.
10. Preserves phase margin (60°) to guarantee output amplifier stability.
11. A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90° from the true axis of sensitivity.
12. The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high.
13. The Status pin output latches high if a Low Voltage Detection or Clock Frequency failure occurs, or the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset by a rising edge on self-test, unless a fault condition continues to exist.

3. Análise

Geral

Segundo a National Instruments, os seguintes itens podem definir as especificações de acelerômetros:

- Offset de zero g (i.e. saída de tensão a 0 g)

Pode variar de sensor a sensor

Pode ser cortada fora a nível de sistema usando a gravidade terrestre como referência de entrada.

- Sensibilidade (i.e. tensão de saída por g)

Pode variar sensor a sensor

Pode ser ajustada a nível de sistema usando a gravidade terrestre como referência de entrada.

- Ruído

Ruído determina a resolução mínima do sensor

Ruído de fundo pode ser reduzido pela restrição da faixa de operação se o ruído é Gaussiano.

- Faixa de temperatura

- Mudança de polarização com temperatura

Como a saída de zero g muda com a temperatura

Pode ser cortada fora a nível de sistema por vários métodos

- Mudança de sensibilidade com temperatura

Como a saída por g muda com a temperatura

Difícil de eliminar sua influência a nível de sistema

- Faixa de Operação

- Consumo elétrico

Potência de ciclo pode ser usada para minimizar o consumo elétrico

Para a escolha do acelerômetro mais apropriado para a aplicação este conjunto de perguntas pode ser bastante útil.

- 1) Você medirá um fenômeno AC como vibração, ou um fenômeno DC como gravidade ou constante de aceleração?
- 2) Qual é o range máximo de g que você espera?
- 3) Qual é o menor sinal que você precisa detectar?
- 4) Qual é a máxima frequência requerida?
- 5) Qual nível de estabilidade é requerido para nulo e sensibilidade do acelerômetro?
- 6) Qual sua expectativa de tamanho e consumo?
- 7) Será montado numa placa de circuito?

Respondidas estas perguntas, pode-se consultar o estado da arte, buscando soluções que atendam os seguintes critérios:

Aquisição de dados: Vibração e choque

Como funciona

Costuma-se medir aceleração de vibração nos eixos x, y e z.

Geralmente analisada no domínio da frequência como aceleração, velocidade ou deslocamento (FFT ou análise de espectro).

Especificações Importantes

Faixa de operação (mínimo e máximo)

Variação Dinâmica (ruído limitado)

Estabilidade de Amplitude (mudanças de sensibilidade com temperatura, tempo).

Por fim, escolhendo a tecnologia apropriada para sensor de aceleração:

Ângulo e Inercial

Precisão DC

Mudança nula com tempo e temperatura

Resolução mg

Vibração e Choque

Variação dinâmica de 1 ug a 100g

Faixa de operação

Estabilidade de Amplitude

Nota-se, que as questões comuns em aquisição de dados são:

- Faixa de Operação
- Resolução
- Precisão

Proposta de Comparação para os Acelerômetros

Para termos de estudo, este trabalho deveria desenvolver uma sistemática de comparação dos modelos apresentados. Os critérios escolhidos foram baseados nas informações pertinentes às aplicações, aliados às informações que considerava-se estarem disponíveis.

Com isso, chegou-se ao seguinte conjunto de informações:

- Preço
- Faixa de Operação
- Processo de Fabricação
- Resposta em frequência
- Temperatura (erro)
- Sensibilidade
- Ruído
- Geometria do capacitor (dispositivo geral)

Confronto de informações

As informações aqui reunidas podem ser sintetizadas numa só tabela que inclua as características desejadas, como forma de visualizar as diferenças entre os modelos:

Tabela 8– Comparação entre os três modelos de acelerômetros (valores médios)

Modelo	1210x-050	ADXL50	MMA3202D
Preço	Não Encontrado	Mais barato	Mais caro
Faixa de Operação de aceleração	+/-50g	+/-50g	+/-100/50g
Faixa de operação de frequência	0-1500 Hz	0-600 Hz	0-400 Hz
Processo de Fabricação	Tecnologia LIGA	Microfabricação de superfície em silício	Microfabricação de superfície em silício
Resposta em frequência	Não encontrado	1300 Hz p/ C1=0,022uF 10 kHz p/ C1=0,0068uF	10 kHz
Faixa de Operação de temperatura	-55 a +125°C	-40 a +125°C	-40 a +85°C
Erro com a temperatura	+300 ppm/°C	0,75/1,00 % de leitura	Não existe
Sensibilidade	80 mV/g	19 mV/g	40 mV/g (eixo y)
Linearidade	0,2%	+/- 1%	+/- 1%
Ruído	316 ug/SqrtHz	6,6 mg/SqrtHz	2,8 mVrms (max)
Geometria do chip	~100 mm ²	3x3 mm	12,81x7,50 mm

Percebe-se que os dados como tirados das tabelas dos fabricantes são um tanto difíceis de se comparar, uma vez que apresentam unidades diferentes, ou até mesmo não se encontram informações sobre o assunto (como é o caso do preço, que vai ser discutido mais adiante).

Preço

O preço tornou-se a mais subjetiva das avaliações, visto que para obtenção de preços necessita-se fazer cadastros em bancos de dados dos revendedores, impossibilitando sua disponibilidade para pesquisa. As únicas fontes obtidas foram meramente qualitativas e bastante tendenciosas, pois eram textos demonstrativos do ADXL50 que citavam sua superioridade em comparação com acelerômetros Bosch e Motorola, principalmente no quesito financeiro. O texto porém destacava que o modelo da Motorola era mais complexo, possuindo vantagens como a compensação de temperatura que o ADXL50 não possuía.

Faixa de Operação de Aceleração e Frequência

A faixa de operação de aceleração obviamente não difere substancialmente de um modelo para outro, visto que procurou-se para este trabalho dispositivos para a mesma aplicação (ativação de Air Bag), assim, não há comentários sobre este quesito.

No entanto, a faixa de operação de frequência varia bastante de um modelo a outro, demonstrando que diferenças construtivas interferem bastante nas características finais do produto. Como será discutido na seção “Processo de Fabricação”, a utilização de outro substrato (níquel ao invés de silício), aliado às diferentes geometrias das barras de torsão alteram a frequência de ressonância do conjunto.

Processo de Fabricação

O processo de fabricação da Silicon Designs usa tecnologia LIGA, diferentemente dos outros dois modelos, que utilizam microfabricação de superfície (surface micromachining) descrito anteriormente. Mudam apenas algumas peculiaridades, porque no caso do modelo da Silicon Designs, que é construído em substrato de níquel ao contrário do que ocorre com os outros dois, que são em silício. O silício já possui vasta bibliografia de seu uso, porém não possui uma indústria nacional muito forte, o que motiva um enfoque maior no processo da Silicon Designs.

Resposta em Frequência

A resposta em frequência dos dispositivos é consequência direta da rigidez e amortecimento do dispositivo como um todo. Estas não são controladas diretamente e a bibliografia leva a entender que seu controle apóia-se em bases puramente empíricas. A rigidez resultante é fruto da geometria da barra de torsão e o amortecimento depende da atmosfera que rodeia a massa sísmica (placa capacitiva). Nos modelos atuais o amortecimento é controlado pelo encapsulamento do elemento sensor, seja com atmosfera controlada (com nitrogênio, mais comum), seja com vácuo. A resposta em frequência limita a faixa de operação do acelerômetro em $\pm 40\%$, que é o fator de segurança utilizado nestes casos. Não foi encontrado valor deste parâmetro na bibliografia para o modelo da Silicon Designs, porém com a consideração do fator de segurança a resposta em frequência poderia ser estimada.

Temperatura

Neste item nota-se claramente porque o modelo MMA3202D da Motorola poderia ser considerado mais caro que os demais, já que possui compensação interna de temperatura, não exibindo variação de sua escala com a variação da temperatura. De acordo com aplicações encontradas durante a pesquisa nota-se que esta característica é bastante vantajosa em alguns casos, porém na aplicação específica deste estudo não se reportou

nenhuma necessidade de tal compensação. Pode-se dizer ainda que o modelo 1210x-050 da Silicon Designs comporta-se melhor com a temperatura que o modelo ADXL50D da Analog Devices.

Sensibilidade e Linearidade

A sensibilidade é facilmente comparável visto que todos os dispositivos são analógicos e os valores de comparação estão nas mesmas unidades. Apesar disso, deve-se notar que o modelo MMA3202D possui sensibilidade nos eixos x e y e portanto o dispositivo deve ser montado de forma a aproveitar o melhor possível para otimizar o aproveitamento da maior sensibilidade do eixo y.

A linearidade reflete o comportamento da curva de calibração do transdutor, ou seja, o quanto esta se desvia de sua condição ideal. Como trata-se de um valor percentual, significa um erro inerente ao processo de medição por toda a faixa de operação do dispositivo.

Ruído

O ruído é um parâmetro importante quando se faz leituras em que seu valor seja da ordem do ruído. No caso de ativação de air bags as acelerações são da ordem de um ou dois dígitos e os ruídos observados estão na casa de mg, assim demonstra-se que apesar de possuírem valores diferentes de ruído, os três não interfeririam de maneira nenhuma na ativação do sistema de segurança em questão.

Geometria do Capacitor

Neste ponto é bom notar que na tabela foi utilizado o parâmetro “geometria do chip” e não como apresentado neste título. Isto se deve ao fato deste parâmetro ser bastante flexível e variar de projeto a projeto. Além disso, o único dispositivo completamente detalhado aqui é o ADXL50D, e parcialmente os dispositivos da Silicon Designs.

A geometria do chip ao menos serve como parâmetro de projeto para o sistema todo de Air Bag.

4. Conclusão

De acordo com as considerações sobre os parâmetros apresentados acima, poderia perceber-se porque o ADXL50D seria considerado o mais barato na comparação. Com ampla divulgação no meio acadêmico, foi o primeiro MEMS desenvolvido para a categoria. Sua utilização já foi bastante estudada, e o estado da arte permitiria um bom acompanhamento em futuros estudos realizados pelo DMC. Sua capacidade de auto teste seria valiosa no ensaio de dispositivos prototipados. No entanto, sua baixa sensibilidade e

relativamente grande ruído dificultam sua utilização em outras aplicações, como medição de vibração em faixas de menor aceleração.

O MMA3202D demonstrou-se o mais completo da categoria, visto que sua capacidade de compensação de temperatura aplica-se em muitas áreas que exigem alta sensibilidade, bem como sua possibilidade de leitura em dois eixos. Mas como se trata de projeto Motorola, a bibliografia existente é escassa, prejudicando qualquer desenvolvimento neste sentido. Na verdade, dados sobre sua fabricação, geometria do dispositivo ou qualquer relatório técnico sequer foram encontrados e sua presença neste trabalho serve para justificar a verificação de novas tecnologias baseadas no mesmo conceito, já considerado antigo.

Quanto aos modelos da Silicon Designs, quase incorrem no mesmo problema dos pertencentes à Motorola: a falta de dados. Os catálogos tornam-se cada vez mais enxutos, omitindo curvas de resposta em frequência, assim como detalhes sobre seu processo de fabricação e geometria final. As grandes vantagens do modelo são o relativo conhecimento do estado da arte pelo meio acadêmico e a seus bons parâmetros de funcionamento quando comparados aos outros dois modelos: alta sensibilidade (um eixo), baixa variação com a temperatura, baixo ruído, boa linearidade e ampliada faixa de operação de frequência (consequência de uma elevada resposta em frequência).

O projeto de acelerômetros no DMC tem sua viabilidade estreitamente dependente da possibilidade de fabricação de protótipos que validem os projetos. Desse ponto-de-vista, o mais viável é o da Silicon Designs, que é microfabricado com a tecnologia LIGA, disponível no Brasil através da empresa METALFOTO LTDA., que tem sólida conexão com o DMC. O projeto do dispositivo da Silicon Designs pode ser adaptado para dispositivos em escala MESO, uma ordem de grandeza maiores que o original, que poderiam ser prototipados rapidamente e a custo zero pela METALFOTO.

Os dispositivos de silício poderiam ser prototipados através de projetos MultiUsuários americanos ou europeus acessíveis através da FAPESP, e esta compilação de características dos dispositivos pode servir de base para projetos dessa natureza.

5. Bibliografia

- Kovacs, Gregory T. A.; Micromachined Transducers Sourcebook. Ed. WCB / McGraw-Hill (1998).
- Petersen, K. E., "Silicon as a Mechanical Material," Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 5, May 1982, pp. 420 – 457.
- www.ni.com - Página da National Instruments (Tutorials e Technical Notes)
- www.motorola.com - Página da Motorola (Technical Notes e Catálogos)
- www.analogdevices.com - Página da Analog Devices (Tutorials, Technical Notes e Catálogos)
- www.silicondesigns.com - Página da Silicon Designs (Technical Notes e Catálogos)
- www.howstuffworks.com - Página de Ciências e Curiosidades
- <http://ccrma-www.stanford.edu> - Center for Computer Research in Music and Acoustics