

História do CMOS

Versão 1.0 (Nov. 2000)
Mauricio Massazumi Oka

Implantação Iônica (I/I) e CMOS

A implantação Iônica (I/I) foi concebido inicialmente, nos anos 50, como sendo bombardeamento iônico, uma das fontes de defeitos induzidos por radiação. Nos anos 60, os engenheiros começaram a vislumbrar o potencial da I/I à medida que entendiam o mecanismo da dopagem substitucional. Nos anos 70 foram encontradas muitas aplicações da I/I que eram fundamentais para o avanço da tecnologia e passou a ser definitivamente incorporado nos processos de fabricação dos dispositivos.

Uma das maiores vantagens da Implantação Iônica (I/I) é a possibilidade de controlar e reproduzir o número de impurezas dopantes dentro do silício, bem como a posição vertical e lateral do seu perfil. Contudo, desde a descoberta da técnica de difusão para formar junções pn, por Pfann em 1952, esta técnica foi a dominante e o uso da implantação iônica em produção só começou nos anos 70.

Já no começo dos anos 50 uma série de patentes pregavam o uso da implantação iônica para a fabricação de dispositivos semicondutores, começando por Ohl, em 1950.

A patente de Ohl aplica a I/I nos contatos de emissor e coletor de um transistor bipolar de contato em ponto para melhorar a estabilidade elétrica da superfície e para aumentar a emissão de elétrons pelo emissor. Recomendava a implantação de espécies como ar, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, hélio, argônio, monóxido de carbono, e mesmo clorofórmio crendo que qualquer elemento implantado poderia alterar o número de cargas elétricas presentes no material.

Ainda em 1950, Lark_Horivitz et. al. introduz o conceito de mascaramento para a I/I.

Em 1953, Sziklai patenteia a idéia de criar várias faixas de regiões p e n por I/I e cascatear transistores.

Em 1954 Shockley propõe a I/I de elementos do grupo III e V para mudar a condutividade do semicondutor e considera a variação da energia para determinar a localização em profundidade dos íons. Isto diferencia sua proposta da de Ohl que prevê o efeito apenas na superfície. Propõe ainda um recozimento a 400°C para reparar os defeitos introduzidos pela implantação. Com isso sugere que seria capaz de produzir um transistor npn.

Do ponto de vista de equipamento, a fonte de íon de gap (?) ("spark-gap ion source") de baixa corrente era conhecido desde 1900. Fontes de ionização de superfície era conhecido desde os anos 20. Isso permitiu a invenção de fontes de plasma DC, aceleradores AC e seletores de massa.

No início acreditava que a dopagem dos semicondutores pela I/I ocorria pela introdução de defeitos no semicondutor. Por exemplo, Thorton e Hanley (1955) fabricaram diodos de contato em ponto de silício usando íons de oxigênio. Cussins (1955) que estudou também o mesmo tipo de diodo, porém usando Ge e I/I de H, B e Sb, concluía que a dopagem tipo p obtida com a I/I era perdida com recozimento.

Depois, de 1956 a 1961 o assunto I/I ficou esquecido por um bom tempo. Em 1961, Rourk et. al. descrevem a dopagem de Si por I/I com elementos do grupo III e V em concentrações de até 10^{18} átomos/cm³ em junção rasa. Este trabalho, aparentemente, estimulou a fabricação dos primeiros dispositivos práticos aproveitando as propriedades químicas dos elementos implantados.

Em 1963, H. Strack publicou sobre a formação seletiva de regiões altamente dopadas. Em 1964, Amadei e Goetzberg propõem pela primeira vez o que veio a ser nos anos 90 a I/I por imersão em plasma. Amadei e Goetzberg propuseram também o uso de máscara de molibidênio sobre óxido para evitar danos ao óxido. Este conceito veio a se tornar importante para a tecnologia MOS de porta auto-alinhada. Ainda em 1963, Ferber propõe a necessidade de um analisador de massa para permitir um estudo mais sistemático da I/I.

Em 1965 J. Lindhard publica sobre sua descoberta, o efeito da canalização. Em 1964 (?) J. A. Davies publica que uma fina camada de óxido na superfície afeta drasticamente o efeito da canalização e também, que um desvio de 7° no ângulo de implantação, para um cristal (110) minimiza a canalização. Ainda em 1965 Manchester et. al. publicam sobre a dopagem direta de Si por I/I de P e B, propõem pela primeira vez o termo "Implantação Iônica" e apresentam o primeiro transistor bipolar completamente fabricado pela técnica de feixes de elétron e de íons. Foi utilizado um recozimento de 700°C por 10 min. No mesmo ano, King et. al. da Ion Physics Corporation (IPC) demonstram uma série de dispositivos fabricados por I/I desde 1962. King trabalhou baseado na sua proposta de 1962 de que a formação da

junção p-n era devido ao B implantado, proposta que à época aparentemente foi aceita com ceticismo pela comunidade que acreditava mais no efeito dos defeitos sobre o valor da dopagem. Por um artigo de 1966 vê-se que o processo da IPC para fabricar FET utilizava máscara de fotoresiste sobre um óxido de 100 nm para evitar a I/I sobre regiões não desejáveis, ou seja uma variante da idéia apresentada por Amadei e Goetzberger em 1964.

Em 1963, um grupo liderado por C. T. Sah, da Fairchild, desenvolveu o primeiro processo comercialmente viável de MOSFET. Alguns detalhes relevantes do processo são: grande cuidado para com a limpeza de todos os processos, gettering de sódio e o desenvolvimento de MOSFET tanto de canal p quanto de canal n com uma vasta gama de características elétricas. A dopagem era feita por difusão e a porta era de alumínio. Um dos principais problemas do processo da Fairchild era o alinhamento da porta em relação às regiões de dreno e fonte.

O problema de alinhamento da porta foi resolvido por uma série de pesquisadores, independentemente. Em 1964 H. A. Kalsen propôs um esquema onde os eletrodos de fonte, porta e dreno são sobrepostos, para alinhar automaticamente a localização das regiões de dreno e de fonte (?? pelo artigo não dá para entender como é o processo). Em 1966, T. S. te Velde inventou um método de fabricação de FET em que a porta é usada como máscara para a I/I, autoalinhando o dreno e a fonte. Em 1966 a Hughes Aircraft Company patenteou o resultado da pesquisa desenvolvida por H. Dill, o uso de um material resistente a alta temperatura, o Si-poli (ponto de fusão de 1410°C) para porta, o que permitiu a difusão de dreno-fonte a alta temperatura após a definição da porta. Em 1966, R. Bower, também da Hughes, patenteou um processo MOSFET de porta-auto-alinhada usando dopagem por I/I, com porta de alumínio e recozimento a baixa temperatura. Em 1967, 5 meses depois da patente de Dill, R. Kerwin, D. Kline e J. Sarace da Bell Labs patentaram também um processo de porta autoalinhada usando silício como material de porta. O interessante que a idéia em si do processo de porta autoalinhada usando silício havia sido concebido também em 1963 por B. Watkins da General Micro-Electronics (GME), spin-off da Fairchild, em 1963, patentado em setembro de 1966, um mês antes da aplicação da patente da Hughes, mas que não foi reconhecido como sendo o primeiro trabalho por nunca ter sido implementado na prática e pelas figuras apresentarem alguns detalhes que tornavam o dispositivo não-operacional.

A invenção do processo com I/I também é cercada de controvérsia. Em 1969, com alguns meses de diferença, Bower e Velde requisaram patente do processo. Em 1966 Bower e Dill haviam apresentado num congresso (IEDM) a idéia de usar I/I com porta autoalinhada de metal e recozimento a baixa temperatura, com possibilidade de usar silício como material de porta associado à dopagem por difusão, mas não chegou a associar a I/I, o Si para porta e o recozimento a alta temperatura. Em 1967 Bower et. al. apresentou na IEDM um processo com porta auto-alinhada de alumínio prevendo uma extensão de baixa dopagem entre o dreno/fonte altamente dopado e a borda da região sob a porta. Em 1971 Dill e Bower relatam a dificuldade de ativar dopantes implantados a baixa temperatura e propõem usar o molibidênio ao invés do alumínio como material de porta. Mas em 1970 Faggin e Klein da Fairchild já haviam demonstrado os apelos do uso de silício como material de porta, que veio a ser a tecnologia dominante. Apesar disso, hoje Bower é reconhecido como o pai da tecnologia de porta auto-alinhada.

O uso de silício como material de porta permitiu outros processos a alta temperatura como o refluxo de PSG a alta temperatura e gettering de metal.

Em 1968 um grupo de engenheiros da Fairchild encabeçados por Noyce e Moore criam uma nova empresa para desenvolver produtos baseados em tecnologia com porta de silício: a Intel.

Depois de que ficou claro que uma etapa a alta temperatura era necessária para eliminar os defeitos da I/I e ativar os dopantes, seguiu-se ainda uma boa fase discutindo o quão alto teria de ser essa temperatura, envolvendo comparações com o processo tradicional de difusão quanto ao tempo de processo, precisão da dopagem, profundidade de junção obtida, etc. A I/I passou a ser a técnica dominante apenas no final dos anos 70 e começo dos anos 80.

O escalamento por campo constante proposto por Dennard em 1974 previa a necessidade de junções rasas, mas a profundidade só tornou-se crítica, a ponto de se passar a usar a I/I, nos anos 80. Além disso, à época era muito difícil obter um bom yield para junções com profundidades da ordem de 1 µm, devido ao spiking.

Inicialmente, para obter junções tipo n mais rasas, tentou-se substituir o fósforo pelo arsênio, que possui um coeficiente de difusão mais baixo, mas a toxicidade da arsina tornava o processo perigoso. A tentativa de usar fornos com bocas tampadas causava uma chuva de particulados sobre as lâminas. A opção pela I/I, no início, foi mais por ser um processo mais limpo que resultava num aumento de yield. Além disso, em 1975, Fair e Tsai provaram que a I/I de As resultava numa concentração maior de dopantes ativados que a sua difusão. O fato de ser relativamente simples obter equipamentos de I/I de alta-corrente no começo dos anos 80 favoreceu a migração para esta tecnologia.

No início não havia vantagens da I/I sobre o tradicional método da difusão para formar dreno e fonte. Uma aplicação chave para a aceitação da I/I foi seu uso pela empresa MOSTEK, em colaboração com a Sprague Electric Company, para controlar precisamente a quantidade de dopantes na região de canal, sob a porta, para controlar a tensão de limiar (V_T). O trabalho de J. MacDougall, K. Manchester e R. B. Palmer foi publicado em 1970. O primeiro trabalho de tal

aplicação da I/I é atribuído a Aubuchon, em 1969, que implantou B através de um óxido de porta de 100 nm com uma energia de 16 keV e dose de 10^{14} átomos/cm². A I/I através do óxido cria, porém, defeitos, necessitando um recozimento para recuperar o óxido. Em 1969 Beale da Mullard Research Laboratory propôs a I/I de uma baixa dose de B antes de crescer o óxido de porta a 1100°C, que causava a difusão do B até uma profundidade de 0,6 µm. Beale havia sugerido também que esta I/I seria capaz de diminuir o punch-through. É interessante observar que durante os anos 70 era necessário crescer um óxido de porta de 50 a 120 nm e como o B segrega-se preferencialmente no óxido seria obrigatório realizar a I/I através do óxido de porta, mas com a diminuição da espessura do óxido de porta passa a ser mais interessante realizar a I/I antes da oxidação de modo a evitar os defeitos no óxido.

Uso de I/I para Transistores Bipolares

As primeiras referências ao uso da I/I em transistores bipolares é de 1965, por Manchester et al. e King et al., onde tanto o emissor quanto a base eram formadas por I/I. O interesse em usar I/I na tecnologia bipolar era obter um melhor controle da dopagem da base, que resultaria numa melhor repetibilidade do ganho do transistor, e um melhor controle da largura da base, que resultaria num melhor controle da velocidade do transistor.

Em 1967 Kerr e Large propõem a difusão do fósforo seguida pela I/I de B e recozimento a 800°C para fabricar transistores npn. Posteriormente ficou claro que seria necessário inverter os dois processos para evitar o "emitter-push effect", causado pela difusão do fósforo que promove a difusão simultânea do B. O mecanismo desse efeito só veio a se tornar claro em 1976. Este processo permitiu usar uma menor concentração de B na base que o processo de dupla difusão mas tendo aproximadamente a mesma concentração de dopantes ativos. O único problema era um valor alto de r_B , que foi inicialmente resolvido por difusão a partir de óxido dopado e finalmente, por uma segunda I/I. Uma outra forma para evitar o "emitter push effect" foi usar As difundido para o emissor ao invés de P, aproveitando a menor difusividade do As e a possibilidade de criar um perfil mais próximo a uma "função caixa" e foi apresentado por Fujinuma et al. em 1969. Foi a primeira demonstração de que a I/I poderia melhorar a qualidade de um transistor, que apresentava f_T de 6 GHz. Posteriormente foram desenvolvidos transistores com dupla implantação (de As e B, ativados a alta temperatura), como o trabalho de Reddi e Yu em 1972.

I/I nos Circuitos Integrados

Algumas invenções importantes envolvendo I/I:

- Em transistores bipolares é desejável que a concentração de dopantes do coletor seja a mais alta possível para reduzir a resistência série do coletor, mas ao mesmo tempo, a mais baixa possível para reduzir a capacitância. Hoje cria-se uma camada enterrada com alta dopagem, criada por I/I, sobre o qual se cresce uma camada de Si epitaxial com baixa dopagem.
- Em 1972, na tecnologia de CI bipolar, era comum usar transistor pnp lateral, que tinha um ganho relativamente baixo e resposta em frequência pobre, e npn vertical. A I/I permitiu fabricar transistores verticais dos dois tipos.
- Em 1971 Shappir demonstra um processo CMOS com I/I e porta de Si-poli. O processo apresentava controle de tensão de limiar por I/I e formação de dreno/fonte autoalinhado.
- Em 1973 Fang et al. demonstram o primeiro transistor com dimensão de porta menor que 1 µm (tipo depleção e enriquecimento) combinando litografia por feixe de elétron e tecnologia de porta de alumínio com I/I.
- Em 1974 Dennard propõe que a I/I pode facilitar o projeto de transistores pequenos. O uso de I/I seletivamente sob o canal permitiria o uso de concentrações menores do substrato, o que reduziria a sensibilidade ao efeito de corpo. Isto permitiria o uso de óxido de portas mais espessos e portanto mais fáceis de crescer. Seria possível criar dreno/fonte mais rasas por I/I, o que seria necessário nos dispositivos menores.
- O processo dominante durante os anos 70 era porta de silício, auto alinhado e dopagem por difusão. Um problema do processo era o consumo de parte do óxido de porta das bordas que formava um bolsão onde podia haver acúmulo de contaminante e era também uma possível ponto de curto-circuito entre a porta e o dreno ou fonte. O problema foi resolvido pelo processo de reoxidação da porta de silício (1976) para "preencher" o bolsão. A I/I através do óxido eliminou a necessidade desta etapa mas tornou-se a base para a invenção do óxido espaçador. Uma série de idéias foram apresentadas, mas o processo que viria a ser padrão foi proposto por Ryden et al. (patenteado em 1984).
- Em 1980, Ogura, da IBM patenteou o processo LDD (Lightly Doped Drain), que diferia do processo proposto por Bower em 1971 pelo fato da região altamente dopada ser formada antes da levemente dopada.

Referências

1. Richard B. Fair, "History of some early developments in ion implantation technology leading to silicon transistor manufacturing", Proceedings of the IEEE, V. 86, n. 1, 1998, pp. 111-137.