

## 8.1. Introdução

- Contexto (das aulas)
- *Contexto (nosso processo)*

## 8.2. Dopagem elétrica

## 8.3. Implantação

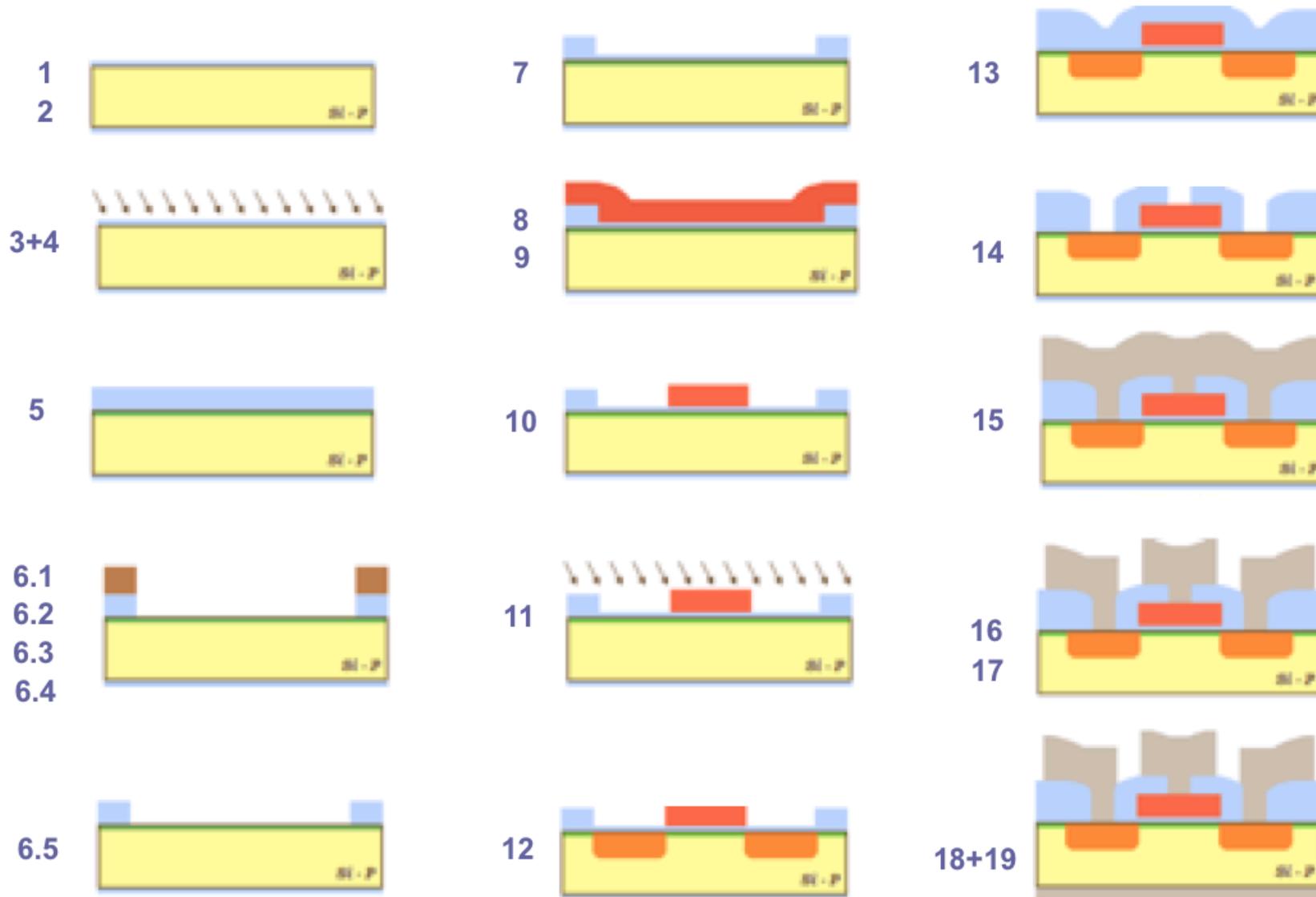
# Contexto da aula

## Microeletrônica Tecnologia dos CI's

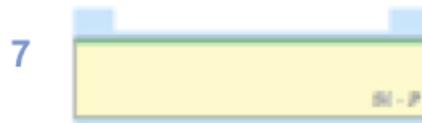
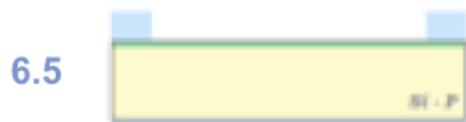
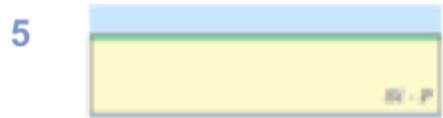
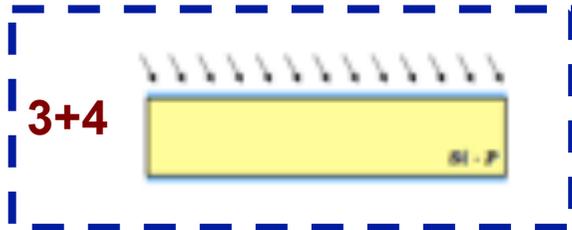
- Obtenção de Materiais
  - Método Czochralski : **Si** (lâminas)
  - Filmes
    - Oxidação : **SiO<sub>2</sub>**
    - “Spin-Coating” : **Fotoresiste**
    - CVD e PVD :
      - **óxido**
      - **Si-Poli**
      - **Metais**
- Fotolitografia (Miniaturização)
- **Dopagem** **Implantação Iônica**
- Corrosão (Definição de geometrias)
- Limpeza

Hoje

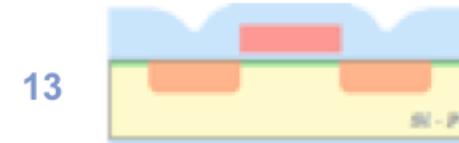
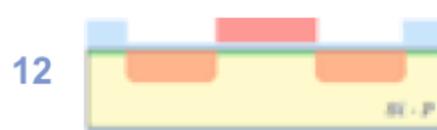
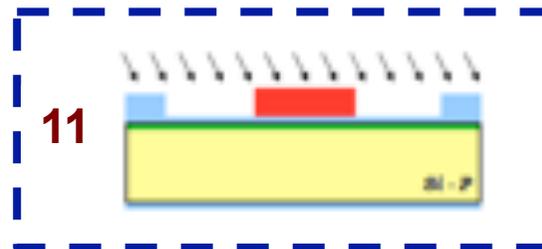
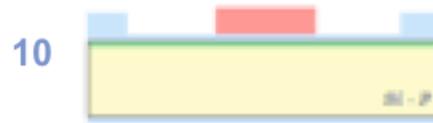
# Implantação lônica em nosso processo



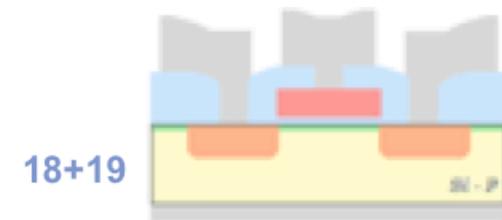
# Implantação lônica em nosso processo



Implantação de **Boro**  
para ajuste de  
 $V_{th}$



Implantação de **Fósforo**  
Para dopar regiões de  
*Fonte e Dreno*



## 8.1 Dopagem Elétrica

- A “**dopagem**” elétrica de um semicondutor envolve a alteração das suas propriedades elétricas através da adição controlada de quantidades ínfimas (partes por milhão ou menos) de certas impurezas específicas. Isto se manifesta de 3 formas bem particulares só encontradas nos semicondutores :
  - ✘ A possibilidade de existirem dois tipos de portadores de carga : **elétrons** (nos materiais **tipo-N**) e **lacunas** (nos materiais **tipo-P**)
  - ✘ A possibilidade de se alterar em ordens de grandeza, a condutividade elétrica do semicondutor
  - ✘ A possibilidade de formar regiões de carga espacial dentro do semicondutor.
- Do ponto de vista tecnológico, estas propriedades são extremamente importantes. É nelas que se baseiam praticamente todos os dispositivos semicondutores e toda a indústria dos Circuitos Integrados.
- Existem basicamente dois tipos de semicondutores dopados :
  - **Semicondutores tipo-N** :  
As impurezas são doadoras de elétrons ( No Si : **P** e As )
  - **Semicondutores tipo-P** :  
As Impurezas são aceitadoras de lacunas ( No Si : **B** )

## Técnicas de Dopagem

- Existem basicamente duas técnicas para dopar Silício, sendo que ambas são utilizadas de forma complementar na fabricação de dispositivos discretos (resistores, capacitores, transistores), Circuitos Integrados e MEMS :

- **Difusão Térmica:**

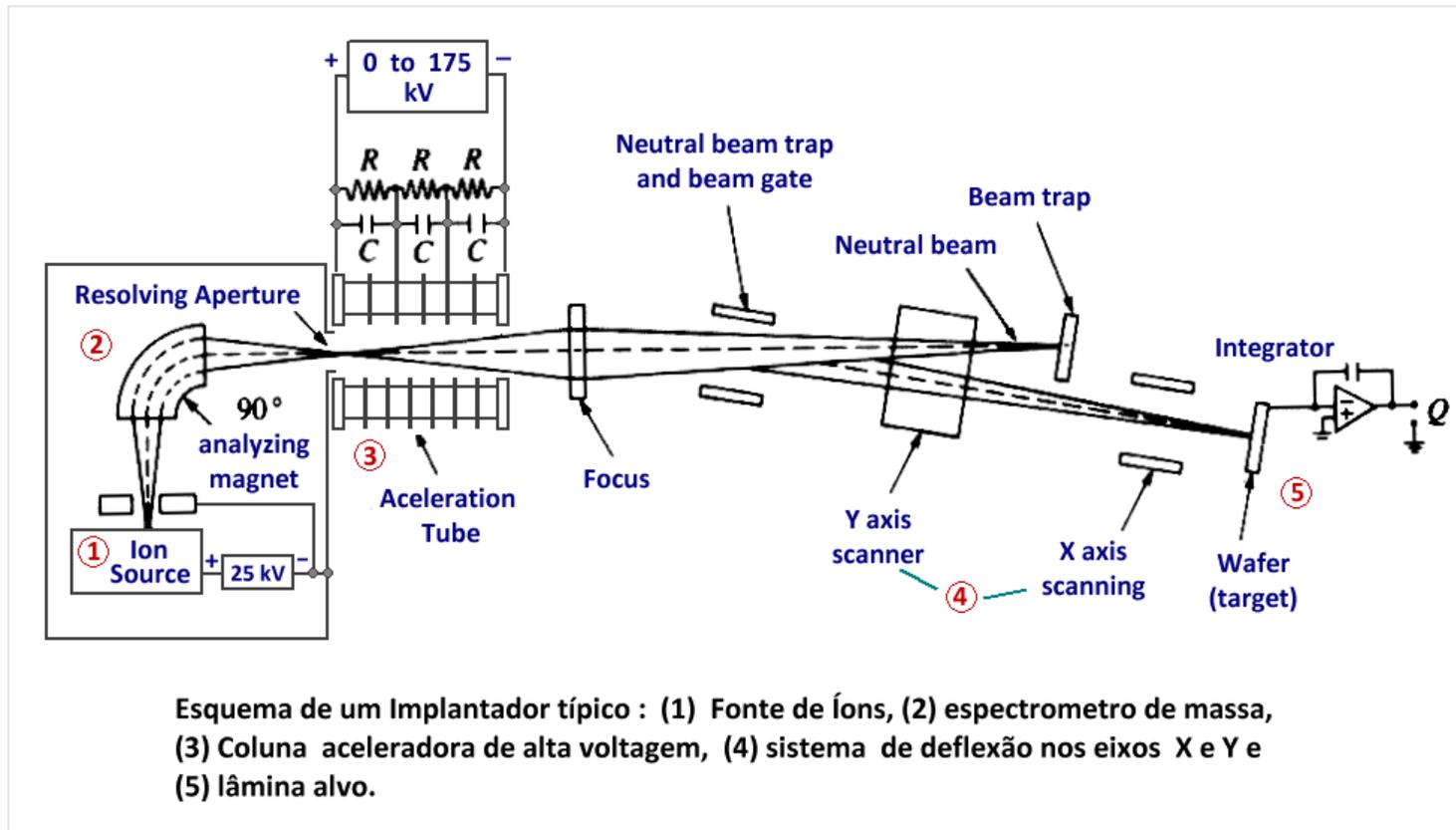
Baseada no movimento espontâneo das partículas de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração. Assim, as impurezas são introduzidas no Si colocando a lamina a ser dopada em contato com uma fonte rica no elemento dopante. Normalmente a fonte de impurezas é um **ambiente gasoso**, mas também podem ser utilizadas películas de **óxido dopado (SOG)** pré-depositadas sobre o lamina de Si. Em ambos casos, a difusão ocorre em altas temperaturas (entre 800 e 1200 °C). Tipicamente é usada na obtenção das junções P-N profundas (em poços N e P de estruturas CMOS por exemplo).

- **Implantação Iônica :**

Nesta técnica, íons ou moléculas ionizadas de elementos dopantes são aceleradas num canhão acelerador e feitos colidir sobre o substrato (alvo) a ser dopado. Os íons no feixe possuem, tipicamente, energias da ordem de algumas dezenas de keV e ao colidir com o alvo (lâmina de Si), penetram no semiconductor abrindo caminho entre os átomos do material através de colisões mecânicas sucessivas. Por esse motivo, o processo de Implantação Iônica não requer altas temperaturas, embora processos de pós-recozimento sejam necessários para ativar as impurezas e/ou reconstruir a rede cristalina do alvo. Tipicamente é usada na obtenção de junções P-N rasas (em regiões de *Fonte* e *Dreno* em transistores MOS por exemplo).

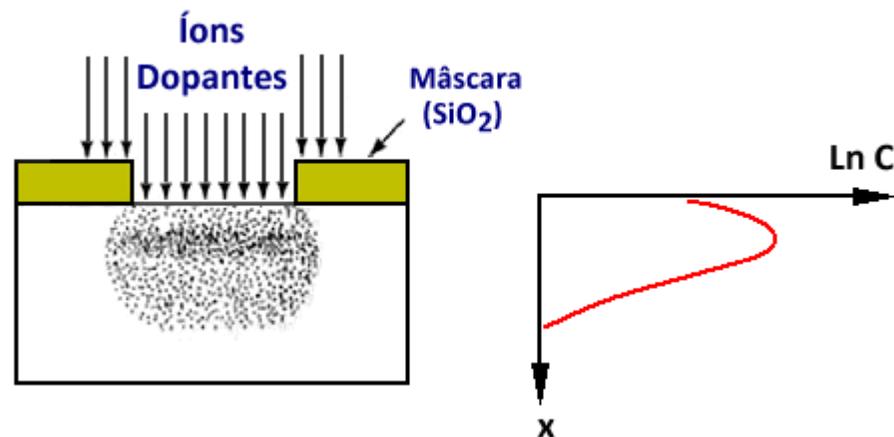
# Implantação Iônica

- Na **Implantação Iônica**, íons ou moléculas ionizadas de elementos dopantes são aceleradas num canhão acelerador e feitos colidir sobre o substrato (alvo) a ser dopado. A concentração total final dos dopantes implantados e a sua distribuição no interior do substrato dependem de fatores como a massa dos íons implantados, a energia de aceleração, a corrente do feixe e a inclinação do substrato em relação ao feixe de íons (para evitar o “channeling”)

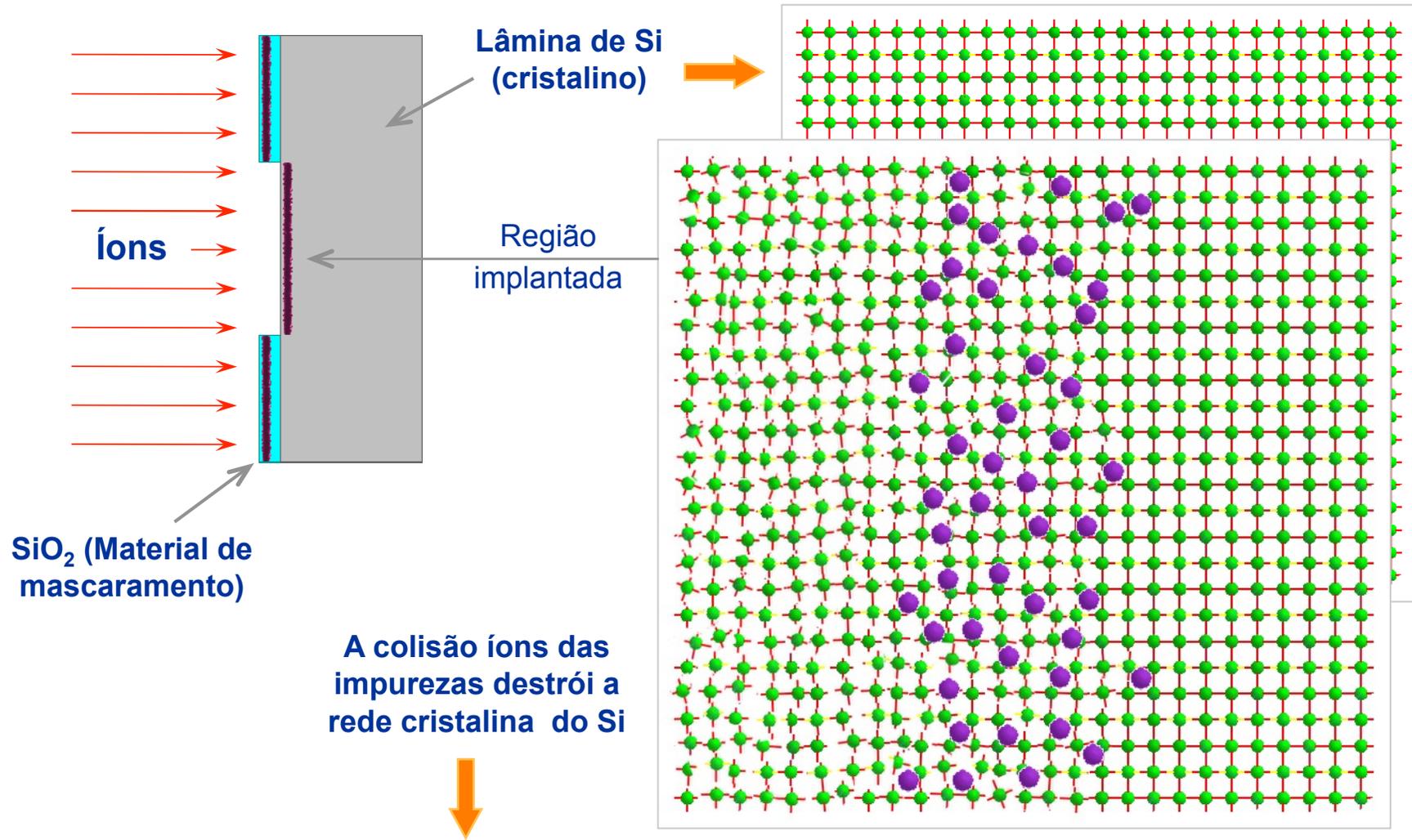


# Implantação Iônica

- Embora possa ser realizada em amostras aquecidas, a Implantação Iônica é realizada normalmente à temperatura ambiente.
- As doses implantadas podem variar entre  $10^{11}$  e  $10^{18}$   $\text{cm}^{-2}$  dependendo da corrente do feixe iônico e do tempo de implantação.
- As energias de implantação podem variar entre alguns keV e algumas centenas de keV, o que em geral leva a profundidade de penetração de impurezas relativamente baixas.
- Contrariamente à difusão térmica, na Implantação iônica a concentração máxima de impurezas não ocorre na superfície do substrato mas sim a uma certa profundidade, o **alcance médio**, que depende da energia de implantação. Por exemplo, o o alcance médio do fósforo implantado com 100 keV em Si de  $\sim 0,15$   $\mu\text{m}$

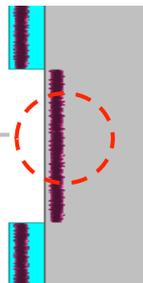


# Implantação Iônica



É necessário um tratamento térmico para reconstruir a rede e ativar as impurezas

Com a rede amorfizada e impurezas inativas, a condutividade elétrica desta região é baixa



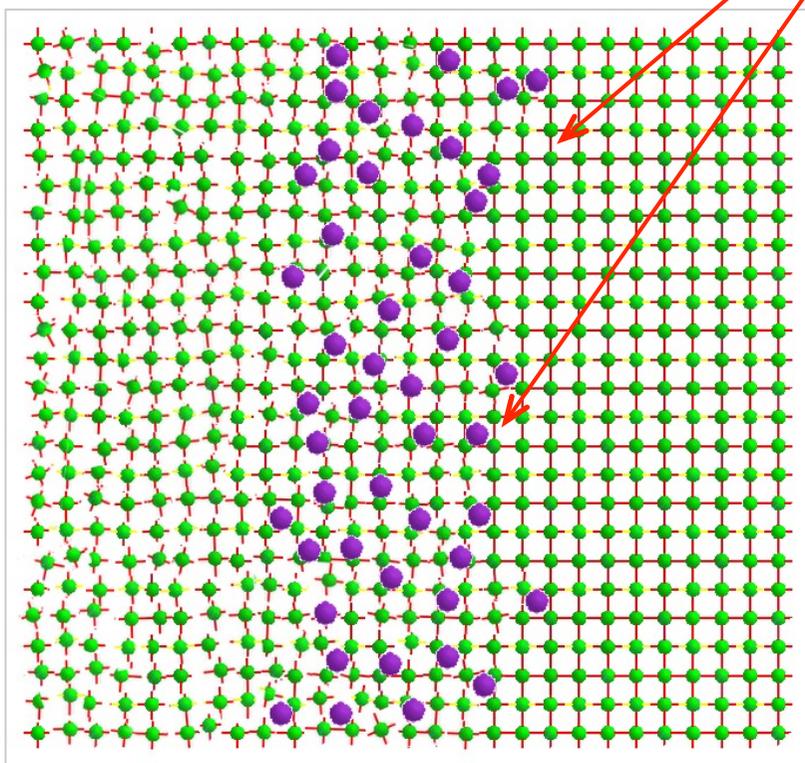
Região amorfizada pela implantação

Note que esta é a região de canal do transistor MOS

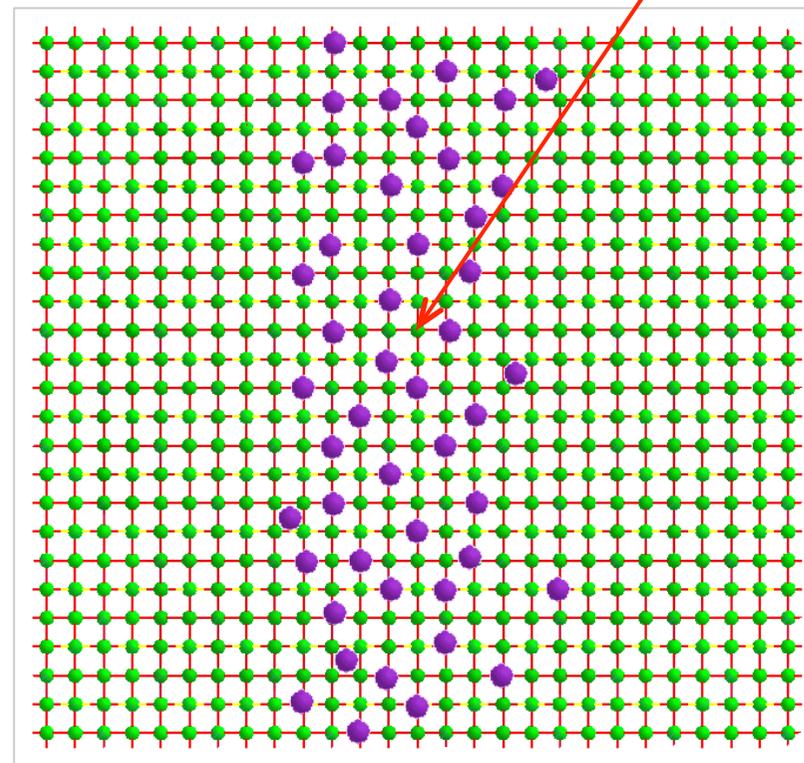
Impurezas entre os átomos de Si e portanto, não ativas como impurezas dopantes

O tratamento térmico a recristaliza a rede e ativa as impurezas

Note que a maioria das impurezas ocupam o lugar de átomos de Si

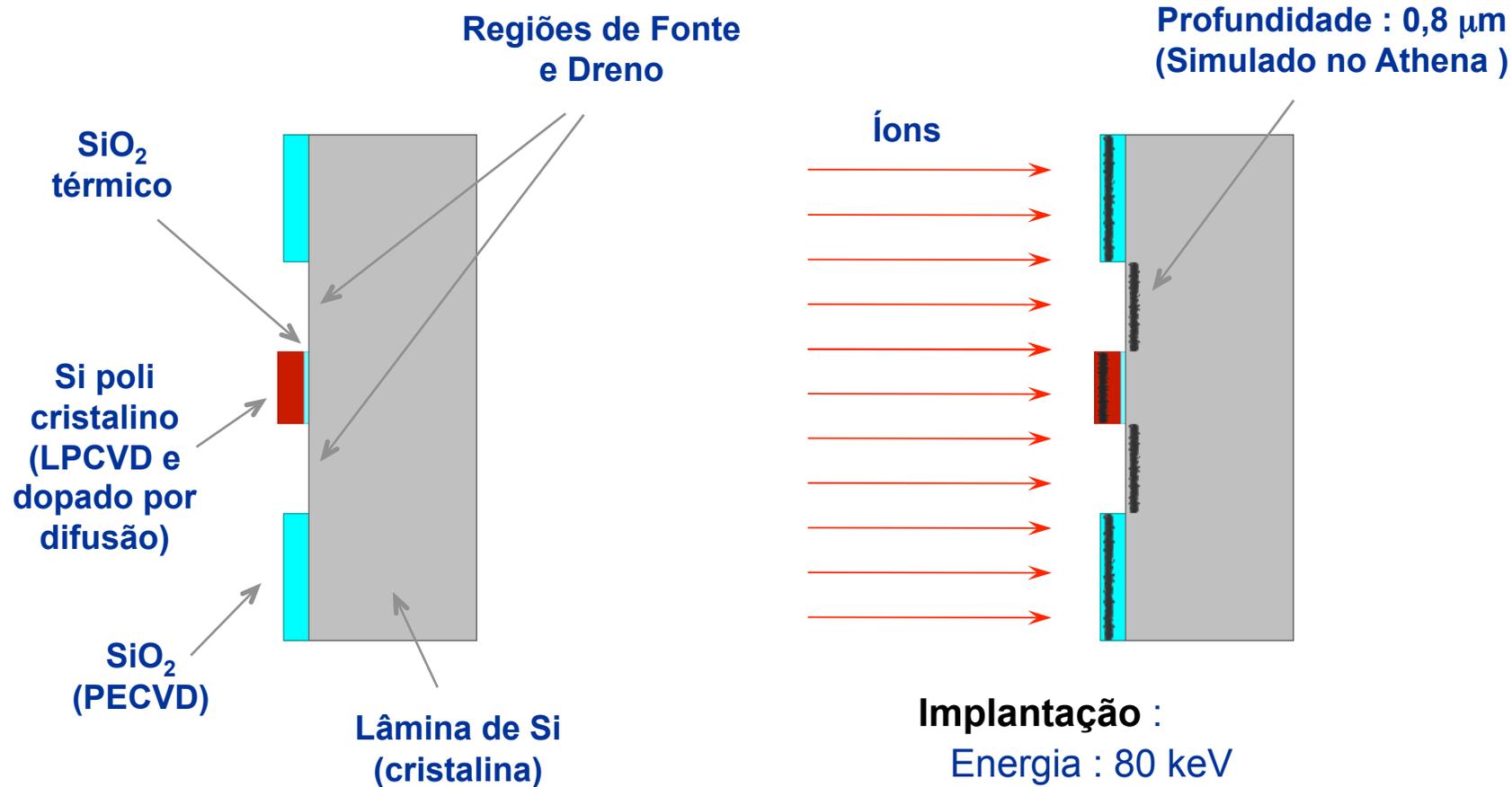


Logo após a implantação



Após o recozimento

## Implantação iônica em nosso processo



### Implantação :

Energia : 80 keV

Dose:  $7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

Concentração:  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

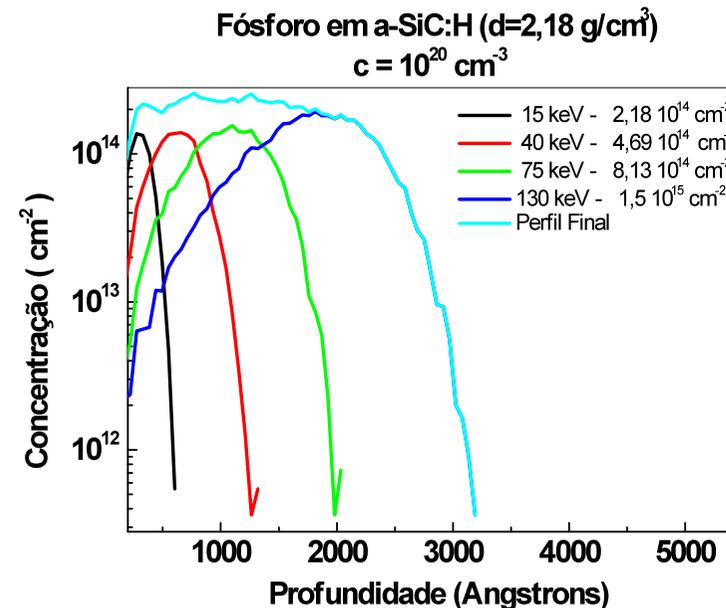
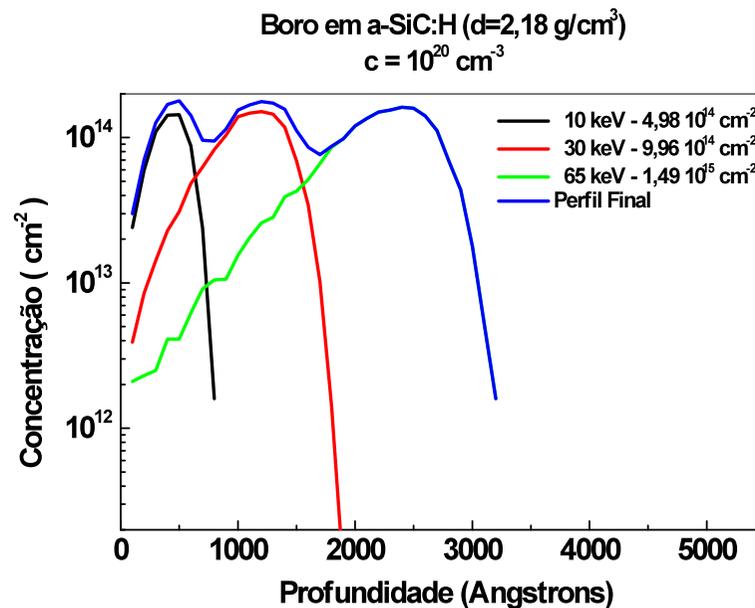
### Recozimento :

Temperatura: 1000 °C

Tempo: 40 min

# Implantação Iônica

- Em geral são necessários processos de recozimento pós implantação para ativar eletricamente as impurezas implantadas.
- Os fenômenos de espalhamento dos íons no interior do substrato são bem conhecidos e portanto existem bons simuladores computacionais da Implantação Iônica. O mais conhecido deles é o programa **TRIM** ( <http://www.srim.org> ).
- Através desta ferramenta é possível prever teoricamente o perfil de dopagem para um certo íon, alvo, energia e dose implantada. Por exemplo, para obter dopagens com um perfil constante de concentração é necessário fazer varias implantações com diferente energia.



## ■ Implantação Iônica vs. Difusão térmica

- A Implantação Iônica ocorre em baixas temperaturas e envolve tempos mais curtos de processamento, além de apresentar melhor homogeneidade e reprodutibilidade
- A Implantação Iônica permite um controle preciso das doses implantadas, o que é particularmente importante para baixas concentrações de dopantes. Por exemplo, o ajuste do  $V_t$  de transistores MOS.
- Na implantação podem ser usados, além do  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , outros materiais para fazer o mascaramento, como fotorresiste e metais
- A Implantação também pode ser feita “através” de películas finas de material de mascaramento,
- Graças ao baixo alcance médio, a Implantação Iônica é ideal para dopagens rasas e com altos gradientes de concentração.
- Varias Implantações com diferentes doses e energia podem ser realizadas em seqüência. Isto permite ajustar e otimizar os perfis de concentração de dopantes.
- A implantação provoca danos na estrutura do substrato

- **Grupo A**
  - **Acompanha um processo de Implantação Iônica**
  - **No LME**
  
- **Grupo B**
  - **Medidas de condutividade em antes e depois da implantação e depois do recozimento para reconstrução da rede cristalina**
  - **No LSI**