

8 Conclusões

Nanoindentações foram realizadas em filmes de GaN não dopado, com orientação [0001]. Os resultados mostraram que ocorre deformação plástica em escala nanométrica através da ativação de vários sistemas de escorregamento do cristal e que estes deslocamentos ocorrem para que a superfície do cristal se ajuste à geometria da ponta, indicando que o mecanismo de deformação é fortemente influenciado pela geometria da ponta utilizada. Os resultados permitem também propor um modelo para o mecanismo de deformação do GaN. Nos estágios iniciais de deformação, o processo de nanoindentação introduz escorregamento em escala atômica que pode ser recuperado se a carga é removida. A impressão residual da indentação torna-se estável somente após o primeiro evento de *pop-in*. Os planos escorregados que convergem abaixo do ponto de aplicação de tensão formam uma região endurecida com uma forma piramidal-hexagonal invertida e uma alta densidade de discordâncias. A partir de uma área de contato crítica, a região endurecida do cristal age como uma extensão da ponta do nanoindentador e quando a tensão produzida por esta ponta efetiva é alta o suficiente, ocorre um grande evento *pop-in* com o escorregamento dos planos atômicos $\{1\bar{1}01\}$, $\{11\bar{2}2\}$ e $\{0001\}$. Material acumulado ao longo das direções $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ foi observado por AFM.

Nanoindentações foram realizadas em filmes de GaN dopado com Si e em filmes de GaN dopado com Mg. Os filmes foram indentados nas mesmas condições dos filmes não dopados permitindo então que os resultados fossem comparados com os resultados obtidos no filme de GaN não dopado. Foi mostrado que é mais difícil produzir deformação mecânica em filmes de GaN dopado, do que no filme não dopado, devido ao fato dos dopantes agirem como barreiras para a propagação de discordâncias. Os resultados mostraram também que é mais fácil produzir deformação mecânica nas amostras de GaN dopado com Mg e não passivadas pelos complexos Mg-H, como as amostras GaN:Mg aquecida e a GaN:Mg MBE, do que na amostra passivada, indicando que a presença de ligações atômicas insatisfeitas nos átomos de Mg facilita a propagação de discordâncias e a conseqüente deformação plástica do material. Quanto maior a concentração dos dopantes mais difícil é para induzir

deformação plástica nos filmes já que maior será a quantidade de barreiras que dificultam a propagação das discordâncias.

Um dos pontos importantes discutidos durante a deformação do GaN está relacionado ao processo de recuperação de pequenos *loops* de discordâncias. Para tentar entender um pouco mais sobre este processo de recuperação do material após uma indentação, nós buscamos estudar um sistema cristalino semelhante ao do GaN como o ZnO. Estudos anteriores mostram que ambos os materiais se deformam seguindo o mesmo processo sendo o ZnO muito mais fácil de ser deformado do que o GaN e desta forma, seria também mais fácil observar o processo de recuperação dos loops de discordância no ZnO. Nanoindentações foram feitas com uma força aplicada máxima de 5 mN em cristais de ZnO com orientações c [0001] e m [$1\bar{1}00$]. A profundidade das impressões residuais das indentação medidas por AFM foi comparada com a profundidade final medida pelo nanoindentador. As amostras foram ainda aquecidas a 100 °C por 15 minutos e depois a 200 °C por 15 minutos, e após cada aquecimento novas medidas da profundidade da impressão residual da indentação foram feitas com o uso do AFM. Para a amostra com orientação c , não foi observada uma autorrecuperação adicional à temperatura ambiente. Após o aquecimento a 100 °C foi observada uma autorrecuperação parcial de aproximadamente 12%, e após o aquecimento a 200 °C foi observada uma autorrecuperação parcial de aproximadamente 27%. Para a amostra com orientação m , foi observada uma autorrecuperação adicional à temperatura ambiente de aproximadamente 14%. Após o aquecimento a 100 °C foi observada uma autorrecuperação parcial de aproximadamente 20%, e após o aquecimento a 200 °C foi observada uma autorrecuperação parcial de aproximadamente 33%. Este processo de recuperação e aniquilação das discordâncias deve ser similar ao observado para as discordâncias metaestáveis do GaN não dopado. Nossos resultados fornecem uma nova visão sobre a autorrecuperação de materiais, o que pode levar ao desenvolvimento de estratégias de recuperação *in situ* de dispositivos nanoestruturados deformados mecanicamente.

Nanoindentações realizadas em filmes de GaN foram também estudadas por catodoluminescência. Foram analisadas indentações em três filmes de GaN: GaN não dopado, GaN dopado com Si e GaN dopado com Mg. Imagens de CL foram feitas em diferentes energias para cada amostra. A região central das marcas residuais e as linhas duplas radiais ao longo da direção a ($11\bar{2}0$) aparecem escuras nas imagens de CL indicando que defeitos não

radiativos podem estar sendo introduzidos durante a nanoindentação. A deformação plástica produzida pelo nanoindentador induz regiões de tensão trativa ao redor da impressão residual da indentação e ao longo das direções a $\langle 11\bar{2}0 \rangle$. A presença de dopantes no filme não parece influenciar na distribuição das regiões de tensão residual induzidas pela nanoindentação já que resultados similares foram obtidos para as três amostras.

Espera-se que os estudos apresentados nessa tese contribuam para uma melhor compreensão dos mecanismos de deformação mecânica do GaN levando ao desenvolvimento de dispositivos funcionais em nanoescala.