

Рис. 2. Энергетическая диаграмма валентной зоны вблизи p -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb гетероперехода, рассчитанная на основании данных рис. 1, б.

Таким образом, анализ распределения концентрации носителей тока в светодиодных гетероструктурах показал смещение n - p -перехода от n -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb-гетерограницы в глубь АО на расстояние 0.8 мкм, связанное с диффузией Ge из сильно легированного эмиттера. Немонотонность распределения дырок, обусловленная разрывом зон, позволила экспериментально установить значение разрыва валентных зон на p -Ga_{0.9}In_{0.1}As_{0.09}Sb_{0.91}/ p -Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.02}Sb_{0.98}-гетерогранице — $\Delta E_v = 56 \pm 13$ эВ.

В заключение авторы благодарят Ю. П. Яковлева за интерес к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. А. Андаспаева, А. Н. Баранов, А. А. Гусейнов и др. ФТП, 24, 1708 (1990).
- [2] У. А. Бекирев, Н. В. Кузнецов, Л. П. Сидорова и др. ФТП, 13, 13 (1979).
- [3] B. W. Hakki. J. Appl. Phys., 52, 6054 (1981).
- [4] I. B. Puzin, V. Ya. Phylipchenko, M. K. Sheinkman et al. Semiconduct. Sci. Technol., 7, 529 (1992).
- [5] Л. С. Берман. Емкостные методы исследования полупроводников, 104. Л. (1972).
- [6] H. Kroemer, Wu-Yu. Chien. J. S. Harris. Appl. Phys. Lett., 36, 295 (1980).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 9, 1993

О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ В АМОРФНОМ НИТРИДЕ КРЕМНИЯ

В. А. Терехов, В. Н. Селезнев, Э. П. Домашевская

Воронежский государственный университет им. Ленинского комсомола, 394093, Воронеж, Россия

(Получено 9 апреля 1993 г. Принято к печати 28 апреля 1993 г.)

Аморфный нитрид кремния благодаря ряду уникальных свойств широко применяется в современной микроэлектронике. Наиболее важным в физике этого материала является изучение спектра локализованных состояний (ЛС) в щели подвижности, определяющего его электрофизические, оптические свойства и возможности применения. Ранее было показано, что рентгеновские эмиссионные SiL_{2,3}-спектры позволяют анализировать характер энергетического распределения

плотности ЛС в щели подвижности пленок SiN_x и установить изменения в спектре ЛС при воздействии электрического поля и ультрафиолетового облучения [1].

В этой же работе была обнаружена чувствительность спектра ЛС к действию электронного пучка, используемого для возбуждения $\text{SiL}_{2,3}$ -спектра пленки. В данной работе проведено более детальное исследование влияния электронного пучка на трансформацию спектра ЛС.

Методика эксперимента

В экспериментах использовались пленки стехиометрического нитрида кремния $\alpha\text{-SiN}_{1,33}$, полученные на кремниевой подложке с подслоем SiO_2 , толщиной 8—10 нм, по силановой технологии в реакторах пониженного давления. Рентгеновские эмиссионные $\text{SiL}_{2,3}$ -спектры были получены на спектрометре-монокроматоре РСМ-500 с аппаратурным уширением 0.3 эВ. Режим работы трубки 3 кВ · 1 мА. Для исследования влияния электронного пучка проводилась многократная последовательная запись только той области спектра, $\text{SiL}_{2,3}$, которая соответствовала ЛС. При этом каждая последующая запись отличалась от предыдущей на величину дозы облучения электронным пучком, равной ~ 1 Кл/см². Для того чтобы учесть плавное уменьшение интенсивности рентгеновского спектра, обусловленное осаждением углеводородной пленки на поверхность образца в процессе съемки, перед каждым проходом участка спектра ЛС фиксировались интенсивности фона и главного максимума валентной полосы. Этот спад интенсивности в условиях нашего эксперимента был незначительным и имел линейную зависимость от времени, что позволяло легко его учитывать при расчете относительной интенсивности спектра соответствующего ЛС.

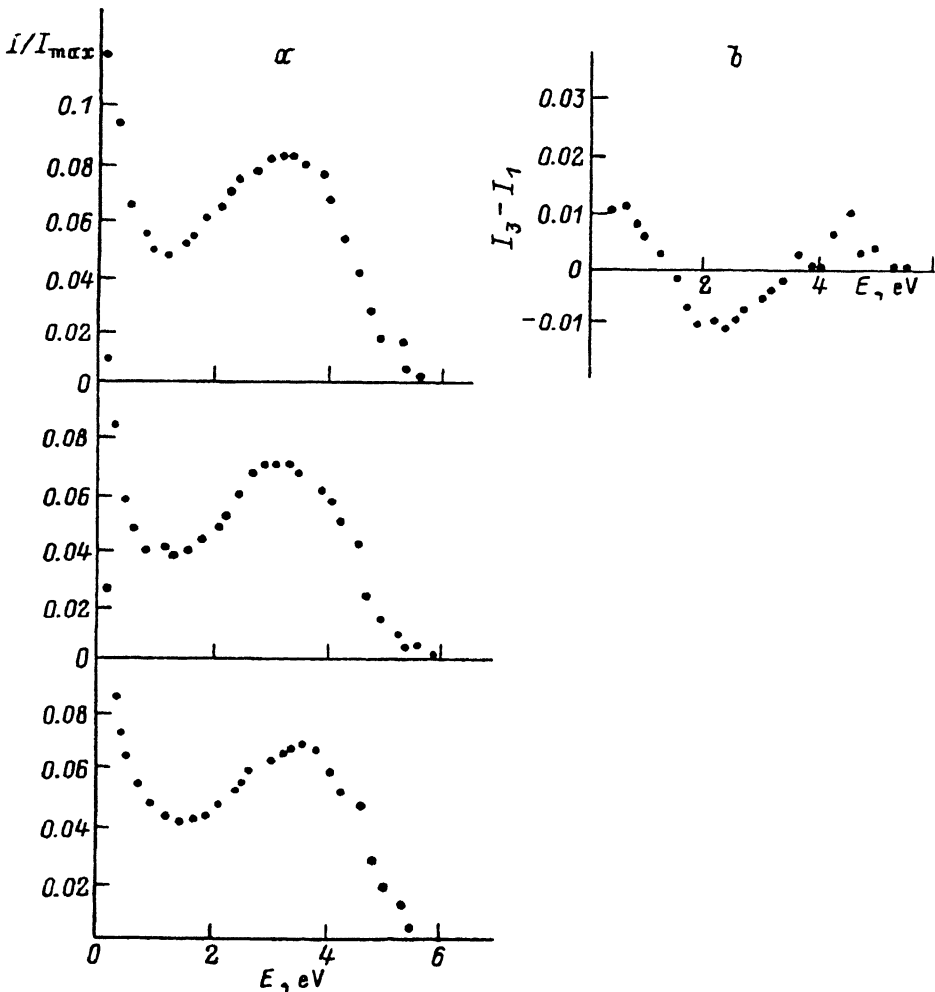
Результаты и обсуждение

На рисунке приведены первые три записи $\text{SiL}_{2,3}$ -спектра, соответствующие ЛС в щели подвижности $\alpha\text{-SiN}_{1,33}$. По оси ординат — интенсивность в спектре по отношению к главному максимуму валентной зоны, по оси абсцисс — энергия относительно потолка валентной зоны E_v . При этом E_v определялась линейной экстраполяцией спада интенсивности в верхней части валентной зоны до уровня фона при записи $\text{SiL}_{2,3}$ -спектра в области валентных состояний. В шкале энергий относительно Si 2p-уровня E_v соответствует значение 99.5 эВ.

На первой записи ЛС, как и ранее в [1], хорошо наблюдаются три особенности плотности ЛС (ПЛС): минимум ПЛС при энергии ($E_v + 1.5$ эВ), плечо в области ($E_v + 2.2+2.7$ эВ) и максимум ПЛС ($E_v + 3.3$ эВ). Как видно из рисунка, с ростом дозы облучения отмечается небольшое уменьшение интегральной интенсивности в области ЛС. В связи с этим при анализе дозовой зависимости плотности состояний в особых точках мы учитываем отношение интенсивностей в этих точках к максимуму интенсивности ПЛС.

Из рисунка видно, что с ростом дозы облучения электронами наблюдается перераспределение плотности ЛС и смещение главного максимума в сторону зоны проводимости E_c , что хорошо согласуется с изменением проводимости и ее энергии активации [1].

Более детальный анализ изменения спектра ЛС позволяет обнаружить явное уменьшение плотности ЛС в области плеча при $E = E_v + 2.5+2.7$ эВ. При трехкратной записи, приведенной на рисунке, это уменьшение составляет $\sim 12\%$, а при дальнейшем увеличении дозы облучения это уменьшение еще более заметно, так что плечо в распределении ПЛС в этой области практически исчезает, и интенсивность спектра становится почти такой же, как в минимуме. Однако с уменьшением ПЛС в области $E = E_v + 2+2.5$ эВ наблюдается рост ПЛС при энергиях $E = E_v + 4.5+4.7$ эВ (см. рисунок), т. е. вблизи зоны проводимости



a — Si $L_{2,3}$ -спектры *b* — Si_3H_4 в области запрещенной зоны. Нуль шкалы энергий — потолок валентной зоны (99.5 эВ относительно Si $2p_{3/2}$ -уровня). Сверху вниз — увеличение дозы облучения электронным пучком.

b — разность интенсивностей третьей и первой записи спектра локализованных состояний.

нитрида кремния. Относительное увеличение ПЛС в этой области достигает $\sim 20\%$. Исходя из этого изменения ПЛС можно предположить, что смещение главного максимума ПЛС в сторону E_c обусловлено перераспределением состояний из области $E = E_v + 2 + 2.5$ эВ в область $E = E_v + 4 + 4.7$ эВ с ростом дозы облучения электронным пучком.

Для более точного определения энергетического положения точек максимального изменения плотности состояний под действием электронного пучка на рисунке *b* приведена также разность между третьей и первой записями спектра ЛС. Для исключения влияния общего спада интенсивности в области ЛС перед вычитанием спектры ЛС были нормированы по интегральной интенсивности спектра локализованных состояний. Из рисунка *b* хорошо видно, что наибольшее уменьшение плотности ЛС при воздействии электронного пучка наблюдается при энергии $E = E_v + 2.2$ эВ, а наибольший рост — при $E = E_v + 4.7$ эВ. Кроме того, наблюдается рост плотности ЛС вблизи E_v ($E = E_v + 0.5$ эВ). Так как в

нашем эксперименте отражаются только те состояния, волновая функция которых локализована вблизи атомов кремния, то приведенные экспериментальные данные можно попытаться объяснить следующим образом.

Согласно [2, 3], одним из наиболее вероятных дефектов в аморфной сетке $\alpha\text{-SiN}_x$ является оборванная связь кремния, которая образует амфотерные состояния вблизи середины запрещенной зоны ($E_v + 3$ эВ). Волновая функция такого дефекта должна быть сильнее локализована на узлах кремния, и он должен хорошо проявляться в локальной плотности состояний кремния и, следовательно, в его рентгеновских спектрах. Оборванная связь на кремнии (Si_3^0), так называемый D -центр [4], может находиться в трех зарядовых состояниях D^+ , D^- , D^0 . Так как D -центры обладают сильным электрон-фотонным взаимодействием с поляронным сдвигом, то изменение зарядового состояния должно приводить к их смещению в энергетической шкале на величину не менее 1.5 эВ.

В соответствии с этим перераспределение ПЛС при облучении электронами из области $E = E_v + 2.2$ эВ в область $E = E_v + 4.7$ эВ можно интерпретировать как переход D^0 в D^- -центры в результате захвата электрона. В этом случае энергетическое положение D^0 -центров в щели подвижности неплохо согласуется с расчетными данными [2, 3], а энергия смещения центра при захвате электрона составляет 2.5 эВ.

Ранее мы наблюдали увеличение плотности занятых состояний у края валентной зоны при УФ возбуждении [1]. Это изменение ПЛС вблизи E_v можно попытаться объяснить на основе поляронной модели [5]. Согласно этой модели, одним из вероятных дефектов в пленке $\alpha\text{-SiN}_x$ являются Si—Si связи, делокализованные орбитали которой (связующая σ и антисвязующая σ^*) в нейтральном состоянии совпадают с краями зон. При захвате электрона на σ^* -орбиталь и при последующем переходе образуется локализованное состояние на расстоянии, недалеком от E_v .

Таким образом, наблюдаемая трансформация спектра локализованных состояний электронов в $\alpha\text{-SiN}_x$ под действием электронного пучка и УФ облучения [1] позволяет предложить модель захвата электронов дефектами типа Si_3^0 и Si—Si в аморфной пленке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Е. Р. Домашевская, В. Н. Селезнев, Е. Н. Десятирикова, В. А. Терехов. Microelectronical Journal, 20, 11 (1989).
- [2] J. Robertson. J. Appl. Phys., 54, 4490 (1983).
- [3] Э. П. Домашевская, Ю. К. Тимошенко, В. П. Терехов, Е. Н. Десятирикова, В. Н. Селезнев. В кн.: Докл. Всес. сем. «Новые идеи в физике стекла». 60. М. (1987).
- [4] R. A. Street. Advances in Physics, 25, 397 (1976).
- [5] В. А. Гриценко, П. А. Пандур. ФТТ, 28, 3239 (1986).

Редактор В. В. Чалдышев