

Возбуждение поверхностных акустических волн в кристаллах p -CdTe при воздействии импульсным лазерным излучением

© А. Байдуллаева[¶], А.И. Власенко, Э.И. Кузнецов, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль, А.Б. Смирнов

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 13 декабря 2000 г. Принята к печати 22 января 2001 г.)

Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства, а также дислокационная структура кристаллов p -CdTe до и после облучения импульсным лазерным излучением. Обнаружено уменьшение величины темнового тока и рост плотности дислокаций не только в облученной, но и в защищенной от лазерного излучения частях кристалла. Изменение характеристик кристаллов объясняется влиянием поверхностной акустической волны, генерированной наносекундным лазерным излучением.

Известно, что облучение кристаллов CdTe импульсами излучения лазера наносекундной длительности приводит к изменению их физических свойств [1–4], что объяснялось образованием собственных точечных и макроскопических дефектов в результате взаимодействия лазерного излучения с исследуемым материалом. Механизмами изменения дефектной структуры могут быть генерация акустических и ударных волн, а также возбуждение электронной подсистемы кристалла. Роль ударной волны в дефектообразовании при лазерном облучении в кристаллах CdTe исследована нами в [3,4]. Для полного понимания механизмов лазерного дефектообразования в полупроводниках, в частности в CdTe, целесообразно исследовать влияние на них и других процессов, происходящих при лазерном облучении кристаллов.

В связи с этим в данной работе исследовалось влияние поверхностной волны, генерированной лазерным излучением, на дислокационную структуру, электрические и фотоэлектрические свойства кристаллов CdTe.

Исследовались специально не легированные пластинчатые кристаллы CdTe p -типа проводимости, полученные методом синтеза из паров исходных элементов, толщиной 100 мкм, с плотностью дислокаций $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$ [5]. Плотность дислокаций определялась по ямкам травления методом оптической микроскопии.

Кристаллы подвергались воздействию излучением рубинового лазера, работающего в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $2 \cdot 10^{-8}$ с и плотностью мощности излучения ниже порога разрушения и плавления материала. Облучалась одна половина поверхности кристалла. Другая половина при этом закрывалась металлической пластинкой или темным лаком для предотвращения попадания лучей. Изменение физических свойств исследовалось в обеих частях кристалла. Контакты наносились на поверхность кристалла так, чтобы изменения их электрических свойств можно было контролировать в обеих половинах образца.

Экспериментальные результаты

Темновой ток (I_d) исходных кристаллов в обеих частях образца почти одинаков, что свидетельствует об однородности кристалла по электрическим параметрам. После воздействия импульсами излучения рубинового лазера с плотностью энергии $E = 0.08 \text{ Дж/см}^2$ в облученной части образца наблюдается рост I_d , а в необлученной части значение I_d почти не изменяется. Увеличение плотности энергии излучения лазера до $E = 0.12 \text{ Дж/см}^2$ приводит к дальнейшему росту величины I_d как в облученной, так и в защищенной частях образца. Такое увеличение темнового тока в p -CdTe объяснялось нами образованием пленки теллура на поверхности кристалла в результате лазерного облучения [1]. Поэтому были исследованы образцы после снятия образовавшейся пленки теллура с поверхности. Пленка теллура смывалась раствором In KOH в метаноле. В таких образцах облучение с плотностью энергии $E = 0.08 \text{ Дж/см}^2$ приводит к уменьшению I_d в облученной части кристалла, а в защищенной части I_d остается почти неизменным (рис. 1, кривые 1 и 2). При облучении образцов с плотностью энергии $E = 0.12 \text{ Дж/см}^2$ величина I_d уменьшается в обеих частях кристалла, причем уменьшение I_d продолжается в течение нескольких часов после облучения.

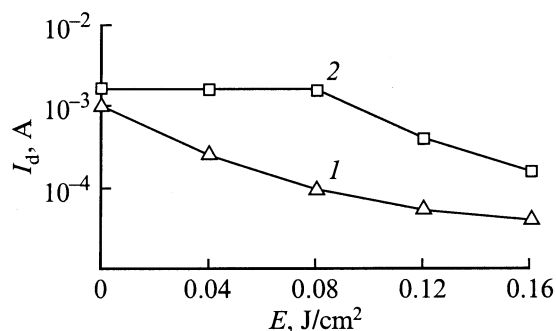


Рис. 1. Изменение темнового тока I_d в кристалле p -CdTe от плотности энергии лазерного излучения. 1 — облученная часть образца, 2 — необлученная.

[¶] E-mail: baidulla@class.semicond.kiev.ua

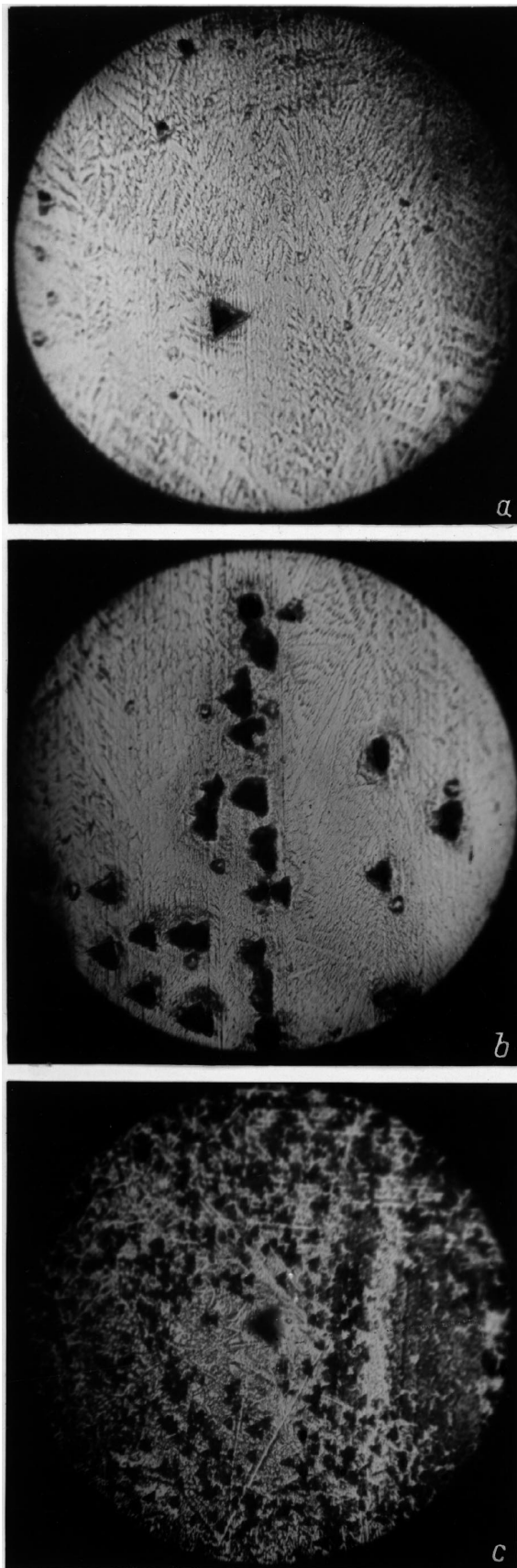


Рис. 2. Дислокационная структура обеих частей кристалла p -CdTe до (a) и после воздействия лазерным излучением с $E = 0.12$ (b) и 0.16 Дж/см² (c).

Исследовались также спектры фотопроводимости защищенной от лазерного излучения части кристаллов p -CdTe до и после облучения образца. После первого облучения с $E = 0.08$ Дж/см² в защищенной части наблюдается уменьшение фоточувствительности кристалла. При увеличении плотности энергии лазерного излучения до $E = 0.12$ Дж/см² происходит дальнейшее уменьшение величины фотопроводимости. Уменьшение величины фотопроводимости продолжается в течение суток и по времени коррелирует со временем релаксации I_d . При этом наблюдается увеличение сопротивления образца в несколько раз.

Известно, что в кристаллах CdTe p -типа проводимости с увеличением плотности дислокаций равновесная проводимость падает [6]. Наблюдаемое уменьшение равновесной проводимости в защищенной части образца априори можно объяснить увеличением плотности дислокаций и в этой части. Поэтому нами исследовалось изменение дислокационной структуры в обеих частях образца в результате лазерного облучения. Плотность дислокаций исходных кристаллов составляла $\sim 10^2$ см⁻² (рис. 2, a). Облучение кристаллов лазерным излучением с плотностью энергии в пределах 0.08–0.16 Дж/см² не приводило к очевидным разрушениям поверхности материала. Однако после селективного травления наблюдалось увеличение плотности дислокаций не только на облучаемой, но и на его защищенной части. Плотность дислокаций возрастала с ростом плотности энергии или дозы облучения. При воздействии лазерным излучением с плотностью энергии $E = 0.08$ Дж/см² наблюдается увеличение плотности дислокаций только в облученной части кристалла. При увеличении плотности энергии излучения лазера до $E = 0.12$ Дж/см² происходит увеличение плотности дислокаций на облученной части и появляются дислокации на защищенной части образца (рис. 2, b). При этом заметим, что в основном дислокации скапливаются на границе облученной и необлученной частей кристалла. Увеличение энергии облучения до 0.16 Дж/см² приводит к увеличению плотности дислокаций в обеих частях кристалла (рис. 2, c). При послойном травлении кристалла плотность дислокаций уменьшается и в облученной части возвращается к исходному значению на глубине 3–5 мкм. В защищенной части кристалла возврат к исходному значению наблюдается на глубине 1–3 мкм.

Обсуждение

Изменение фотопроводимости и I_d в кристаллах p -CdTe непосредственно в облученной части образца описано в [1–3] и объяснено размножением дислокаций в результате действия облучения и стеканием на них акцепторов из объема. В этом случае механизмом образования дефектов является совокупное воздействие процессов, происходящих при лазерном облучении, т. е.

фотоэффект, возникновение упругих (акустической и ударной) волн в кристаллической решетке, нагрев и т.д.

Далее попытаемся проанализировать результаты эксперимента, полученные для защищенной части образца. Условия эксперимента были таковы, что фотоэффект в защищенной части кристалла исключается. Влияние ударной волны, генерированной от импульса излучения лазера, также исключалось в силу того, что такая волна должна распространяться в глубь образца. Образовавшаяся ударная волна не может переходить в поверхностную ударную волну, поскольку глубина образования ударной волны при используемых интенсивностях лазерного излучения велика. Для CdTe при $E = 0.16$ Дж/см² глубина составляет $y = 39$ мкм. Как показывают экспериментальные результаты, глубина изменения свойств материала меньше, чем глубина образования ударной волны. Появление дислокаций в защищенной части образца не может быть объяснено также нагревом облучаемой части кристалла, поскольку распространение нагрева происходит, по нашим оценкам, в пределах ~ 0.35 мкм, т.е. на расстояния, намного меньшие, чем длина исследуемого образца.

Причина возникновения дислокаций при лазерном облучении в защищенной части кристалла, возможно, связана с возникновением механического напряжения, которое порождает акустические волны широкого диапазона частот с разнообразными пространственными характеристиками [7,8]. Акустические волны могут переносить энергию лазерного излучения на расстояния, существенно превышающие размеры области ее поглощения. Если плотность переносимой энергии достаточно велика, то акустические волны могут быть одним из источников так называемых эффектов дальнего действия, возникающих при лазерном облучении, в частности дефектов кристаллической решетки вне области лазерного воздействия. При этом величина сигнала поверхностной акустической волны (ПАВ) пропорциональна напряжению поверхности, а форма ее импульса испытывает заметное изменение с удалением от зоны облучения [9]. С удалением зоны облучения увеличивается общая ширина импульса, а его передний край расщепляется в серию импульсов. Наблюдаемая картина появления дислокаций в зависимости от плотности энергии лазерного излучения, возможно, связана с этим свойством ПАВ, что описано в работе [9]. При малой плотности энергии лазерного излучения (механического напряжения, переходящего в упругую волну) дислокации появляются непосредственно в области лазерного облучения. С увеличением плотности энергии лазерного излучения дислокации появляются сначала на границе двух частей, а затем и на необлученной части кристалла (рис. 2, b, c).

Исчезновение ямок травления при послойном травлении свидетельствует о поверхностном характере возмущения. При этом дислокации закорачиваются на переднюю поверхность кристалла. Это, по-видимому, может приводить к отслоению приповерхностной области кристалла.

Как показало послойное травление облученных образцов, глубина изменения характеристик кристаллов непосредственно в области лазерного облучения больше, чем в необлученной части материала. Возможно, это обусловлено тем, что глубина распространения поверхностной акустической волны с удалением от источника возбуждения уменьшается; следовательно, уменьшается и глубина ее влияния.

Механизмами появления дислокаций в необлученной части кристалла могут быть как зарождение новых дислокаций непосредственно в необлученной части кристалла, так и движение дислокаций из облученной части в необлученную часть кристалла в поле акустической волны.

Таким образом, несмотря на то, что кристаллы CdTe менее упругие, чем такие пьезоэлектрики, как CdS или GaAs, можно предположить, что генерированная при лазерном облучении волна является поверхностной акустической волной. Такая волна способна изменять электрические и фотоэлектрические свойства и дислокационную структуру образцов вне источника возбуждения и, следовательно, может быть использована в качестве неразрушающего метода создания дислокационных структур в кристаллах CdTe. Последнее, т.е. создание дислокационной структуры, может быть одним из решений проблемы надежности полупроводниковых приборов на основе A^{II}B^{VI}.

Регистрация поверхностной акустической волны при облучении кристаллов p-CdTe импульсами излучения рубинового лазера и анализ формы сигнала ПАВ требуют дальнейшего исследования.

Авторы выражают благодарность Б.М. Булаху за предоставление кристаллов.

Список литературы

- [1] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, В.А. Гнатюк, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **23**, 56 (1993).
- [2] А. Байдуллаева, Б.М. Булах, Б.К. Даулетмуратов, Б.Р. Джумаев, Н.Е. Корсунская, П.Е. Мозоль, Г. Гарягдыев. ФТП, **26**, 801 (1992).
- [3] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Ю.В. Власенко, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **30**, 1438 (1996).
- [4] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Б.Л. Горковенко, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль. ФТП, **34**, 443 (2000).
- [5] Б.М. Булах, С.М. Красикова. Известия АН СССР. Неорг. матер., **9**, 1112 (1973).
- [6] Б.Р. Джумаев, Г. Гарягдыев, И.Я. Городецкий, Н.Е. Корсунская. Тез. докл. Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках (Ташкент, 1989) с. 126.
- [7] А.А. Карабутов. УФН, **47**, 605 (1985).
- [8] С.К.N. Patel, A.C. Tam. Rev. Mod. Phys., **53**, 517 (1981).
- [9] D. Schneider, R. Hammer, M. Jurish. Semicond. Sci. Technol., **14**, 93 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Stimulation of surface acoustic waves in p -CdTe crystals under the pulse laser irradiation

A. Baidullaeva, A.I. Vlasenko, E.I. Kuznetsov,
A.V. Lomovtsev, P.E. Mozol, A.B. Smirnov

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract The electric and photoelectric properties alongside with dislocation structures of p -CdTe crystals have been investigated before and after pulse laser irradiation. Decrease of the dark current and increase of the dislocation density were observed not only in irradiated parts but also in non-irradiated parts of crystals. These changes can be explained by influence of surface acoustic waves generated by the nanosecond pulse laser radiation.