

УДК 621.315

Ж. Г. ДЖУМАМУХАМБЕТОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО InP

Показано, что возникающее термическое напряжение вследствие воздействия импульсного лазера приводит к многочисленным смещениям. С увеличением плотности энергии облучения растет плотность смещения и при $250\div 300$ Дж/см² получаем плотность $8,4\cdot 10^7$ см⁻².

Как известно [1, 2], воздействие импульсов лазерного излучения на полупроводниковые соединения может привести к значительному изменению морфологии поверхности. Причем наиболее вероятной причиной наблюдаемого изменения морфологии является селективное испарение компонентов соединения и образование слоя нестехиометрического состава.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния лазерного облучения на структуру и плотность дислокаций в приповерхностном слое InP.

Исходными объектами служили монокристаллы фосфида индия с концентрацией свободных электронов $2\cdot 10^{17}$ см⁻³, выращенные методом Чохральского и легированные оловом. Кристаллы вырезались из слитка в виде пластин толщиной около 1500 мкм с внешней поверхностью, параллельной плоскости (111). После механической полировки алмазной пастой с размером зерен 0,25 мкм пластины подвергались химической полировке в травителе $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:6) с последующей промывкой в дистиллированной воде.

При исследованиях структуры поверхностного слоя использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-2 с регистрацией монохроматизированного FeK_α -излучения с длиной волны 1,93597 Å. На дифрагированном пучке использовался графитовый монохроматор. Режимы съемки дифрактограмм: напряжение 20 кВ, ток 20 мА, размеры щелей 1,00:1,00:0,25 мм. Полученные рентгенограммы расшифровывали по общепринятой методике [3] с использованием данных картотеки ASTM [4] и справочника [5].

Брэгговский угол дифракции изменялся от 0 до 50° в режиме (θ–2θ)-сканирования. Толщина слоя кристалла, участвующего в образовании дифракционной картины, оценивалась по формуле, приведенной в справочнике [5], и составляла 0,3 мкм.

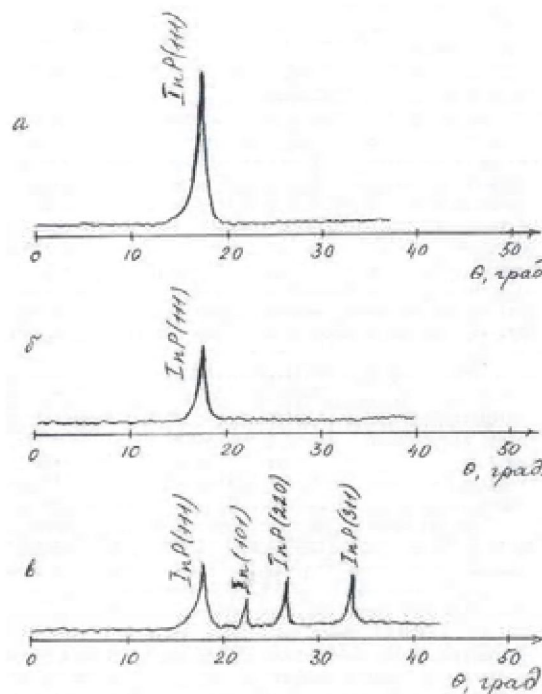


Рис. 1. Рентгеноструктурный анализ кристалла InP до (а) и после облучения различной плотностью энергии 100 Дж/см² (б) и (250÷300) Дж/см² (в)

Дифрактограммы исходных кристаллов (рис. 1, а) содержали отражение от плоскости (111) с максимумом интенсивности первого порядка дифракции при угле скольжения 16,600°. При этом обнаруживалось явно выраженное уширение линии, которое, как оказалось, было следствием поверхностных микронапряжений, возникших после механической обработки кристалла.

После стравливания слоя толщиной 50–100 мкм на дифрактограммах также наблюдается отражение от плоскости (111) с той лишь разницей, чем до травления. Для указанной толщины стравленного слоя ширина линии минимальна и не изменяется при увеличении его толщины, что свидетельствует о снятии механических напряжений. Полуширина линии при этом составляет $1,710\cdot 10^{-3}$ рад, а

параметр решетки, определенный по этому отражению, равен $5,867 \text{ \AA}$ (по данным [4], он составляет $5,869 \text{ \AA}$).

При комнатной температуре кристаллы обрабатывали импульсами лазерного излучения равномерно по всей поверхности. Источником излучения служил лазер на стекле с неодимом ГОС-301, работающий в режиме свободной генерации с длительностью импульса 4 мс и длиной волны $1,06 \text{ мкм}$.

Энергия лазерного импульса, падающего перпендикулярно поверхности кристалла, изменялась с помощью блока управления лазера, а контроль осуществлялся с помощью приемника лазерного излучения ИМО-2Н.

При обработке кристаллов одиночным импульсом лазерного излучения никаких структурных изменений на дифрактограммах не наблюдали и кристаллы разрушались при плотности энергии $E_{кр} = 12\text{--}16 \text{ Дж/см}^2$, в то время как при обработке серией импульсов с энергией $E < E_{кр}$ кристаллы не разрушались даже при плотности энергии в последнем импульсе серии 80 Дж/см^2 . Суммарный флюенс лазерного облучения колебался от 4 до 300 Дж/см^2 . В таких условиях облучение серией импульсов приводит к нагреву поверхности и образованию структурных дефектов, которые, как известно, и обеспечивают упрочнение кристаллов. Серия импульсов состояла из $10\text{--}15$ «упрочняющих» импульсов с плотностью энергии в каждом импульсе $4\text{--}8 \text{ Дж/см}^2$ и $1\text{--}3$ «модифицирующих» импульсов с плотностью энергии в импульсе $40\text{--}80 \text{ Дж/см}^2$. Интервал времени между импульсами определялся технической возможностью лазера и составлял 20 с .

После воздействия серии лазерных импульсов с суммарным флюенсом $\sim 100 \text{ Дж/см}^2$ визуально наблюдается изменение морфологии полированной поверхности в виде ее оплавления. При этом на дифрактограммах обнаруживается отражение только от монокристаллического состояния InP (см. рис. 1, б). Следует отметить, что положение максимума этой линии относительно исходной смещен в сторону больших углов дифракции ($16,640^\circ$), интенсивность уменьшается на 30% , а полуширина больше исходной ($1,780 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$). Параметр решетки, определенный по положению этой линии, оказывается меньше, чем у исходного кристалла, и составляет $5,8537 \text{ \AA}$.

На дифрактограммах кристаллов InP, обработанных серией импульсов с суммарным флюенсом $250\text{--}300 \text{ Дж/см}^2$, наряду с отражением монокристаллического состояния наблюдаются слабые отражения поликристаллического InP и выделения металлического индия (см. рис. 1, в).

При этом положение максимума монокристаллического отражения $16,680^\circ$, интенсивность в два раза меньше, чем у исходного кристалла, а полуширина больше – $1,846 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$. Параметр решетки равен $5,8416 \text{ \AA}$.

Таким образом, с увеличением суммарного флюенса лазерного излучения полуширина линии монокристаллического состояния увеличивается (рис. 2), а параметр решетки, определенный по положению этой линии, уменьшается.

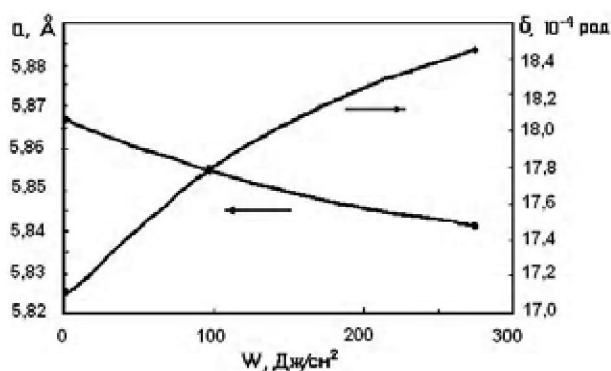


Рис. 2. Зависимость параметра решетки a и полуширины δ линии монокристаллического состояния от плотности энергии облучения

Появление на дифрактограммах отражений, соответствующих металлическому индию, свидетельствует о том, что обработка поверхности InP импульсами лазерного излучения приводит к испарению фосфора из облучаемой области и, как следствие, к образованию неравновесных вакансий в подрешетке фосфора. Поэтому уменьшение параметра решетки с увеличением суммарного флюенса лазерного облучения может быть связано с вакансионным сжатием решетки.

Следует заметить, что при достаточно большом пересыщении по вакансиям в облучаемой области образуются неравномерно распределенные по глубине включения индия. Эти включения в условиях вакансионного пересыщения будут являться эффективными источниками дислокаций [6].

Как показано в работе [7], уширение линии рентгеновского отражения обусловлено дислока-

циями в кристалле, плотность которых связана с полушириной линии соотношением $\rho = (K \cdot \Delta\delta \cdot \text{ctg}^2\theta)/a^2$, где $K=1,39$ для 75% поглощения рентгеновского излучения, $\Delta\delta$ – относительное уширение линии, θ – угол дифракции, a – параметр решетки.

Если воспользоваться приведенными численными значениями параметров, то плотность дислокаций в модифицированном слое при облучении серией импульсов с суммарным флюенсом ~ 100 Дж/см² составляет $\sim 2,2 \cdot 10^7$ см⁻², а при 250÷300 Дж/см² – $8,4 \cdot 10^7$ см⁻².

Таким образом, термические напряжения, возникающие во время импульсного лазерного облучения, приводят к появлению значительного количества дислокаций, плотность которых с увеличением суммарного флюенса облучения увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джаманбалин К.К., Дмитриев А.Г., Сокол-Номоков Э.Н., Уханов Ю.И. Изменение морфологии поверхности InP, GaAs, InAs под действием лазерного излучения пороговой плотности потока // ФиХОМ. 1990. В. 2. С. 20-23.
2. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентге-

нографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970. 366 с.

3. ASTM Gard File (diffraction Data Cards and Alphabetical and Grouped Numerical). Index of X-ray Diffraction Data. Philadelphia: Ed. ASTM, 1969.

4. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М., 1961. 863 с.

5. Флехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.

6. Wilkens M. Das mittlere spannungsquadrat $\langle \delta^2 \rangle$ begrenzt regellos verteilter versetzungen in einem zylinderförmigen körper // Acta metal. 1969. V. 7, N 17. P. 1155-1159.

Резюме

Лазер импульсі әсер еткен кезде пайда болатын термиялық кернеу көптеген жылжулардың санын тудыратындығы көрсетілген. Сәулеленген энергия тығыздығы артқан сайын жылжыту тығыздығы артады да 250÷300 Дж/см² кезінде $8,4 \cdot 10^7$ см⁻²-қа жуық тең болады.

Summary

It is shown the thermal stresses induced during laser pulse action result to significant increase a dislocation density. The dislocation density increases with rising the laser irradiation fluence and equals about $8,4 \cdot 10^7$ cm⁻² at the fluence 250÷300 j/cm².

Атырауский государственный университет им. Х. Досмухамедова,
г. Атырау

Поступила 20.04.05г.