

УДК 621.383.4/5
ББК 32.86
Т 78

Т78 Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 2. – М.: АО «НПО «Орион», 2018 г. – М.: Издательство «ОФСЕТ МОСКВА», 2018. – 611 с.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион» раз в 2 года проводит Международную научно-техническую конференцию и школу по фотоэлектронике и приборам ночного видения. В конференции принимают участие специалисты отечественных и зарубежных организаций, связанных с разработкой и производством изделий фотоэлектроники, приборов ночного видения, тепловизионной техники и смежных отраслей. Данный сборник состоит из двух томов. Том 1 содержит пленарные и устные доклады, том 2 – стендовые доклады, представленные на XXV конференции, состоявшейся 24–26 мая 2018 г.

Сборник предназначен для специалистов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

С26 О нагреве $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ в процессе ионно-лучевого травления

¹ Талипов Н.Х., ² Войцеховский А.В.

¹ Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: niyazt@yandex.ru

Ионно-лучевое травление (ИЛТ) применяется в технологии создания как фотодиодов, так и фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ). Поскольку в p -КРТ при ионной бомбардировке происходит формирование $n^+ - n^- - p$ структуры, в которой глубина n^- -слоя существенно зависит от температуры [1], представляет интерес определение температуры материала в процессе ИЛТ. В работе представлены результаты расчетов температуры $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ при различных режимах ионно-лучевого травления.

Ионы, бомбардирующие поверхность КРТ при ИЛТ с энергиями 0,5–1 кэВ, проникают на глубину всего лишь единиц нанометров, то есть всего на несколько постоянных решетки, которая для $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ составляет 0,646 нм. Согласно расчетам SRIM-2013, для ионов Ag^+ с $E=0,5$ кэВ доля энергии, идущей на ионизацию ($\varepsilon_{\text{ион.}}$), составляет 27 %, дефектообразование ($\varepsilon_{\text{деф.}}$) – 32 %, а передается фононам ($\varepsilon_{\text{фон.}}$) – 41%. Плотность мощности ионного пучка, бомбардирующего поверхность в процессе ИЛТ, при типичной плотности тока 0,2 мА/см² и энергии ионов Ag^+ 0,5 кэВ составляет $P=0,1$ Вт/см². Существенную роль играет то, что вся энергия ионного пучка при ИЛТ Ag^+ с $E=0,5$ кэВ эффективно поглощается фононами в очень тонком поверхностном слое $d \approx 5$ нм. Следовательно, объемная плотность мощности (Q_V), поглощаемая в слое толщиной d , который является внутренним источником нагрева, и от которого тепло очень быстро распространяется в объем КРТ, составляет величину $Q_V = (\varepsilon_{\text{фон.}} + \varepsilon_{\text{ион.}})P/d \approx 1,4 \cdot 10^5$ Вт/см³. Время установления стационарного потока тепла можно оценить из коэффициента теплопроводности

$$a = \frac{\chi}{\rho_V C_p}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент теплопроводности, ρ_V – плотность и C_p – удельная теплоемкость. Плотность $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ равна 7,587 г/см³. Температурная зависимость удельной теплоемкости в интервале $T = 300\text{--}673$ К описывается следующим выражением [2]:

$$C_p(T) = 0,058 \cdot T + 149,76 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (2)$$

из которого следует, что при $T=300$ и 673 К величина $C_p=167,16$ и $188,79$ Дж/(кг·К) соответственно. Не теряя общности рассуждений, для оценочных расчетов температуры примем среднюю величину $C_p=178$ Дж/(кг·К). Согласно расчетам, выполненным в [3], коэффициент теплопроводности $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ изменяется в температурном интервале 300–400 К от 0,041 до 0,030 Вт/(см·К). Примем среднее значение $\chi=0,035$ Вт/(см·К). Тогда из (1) получаем $a=2,6 \cdot 10^{-2}$ см²/с. Образцы объемного КРТ обычно имеют толщину $d=0,08\text{--}0,1$ см. Эта величина d много больше глубины приповерхностного слоя, в котором происходит поглощение энергии внедряемых ионов Ag^+ . Следовательно, от момента начала ионной бомбардировки поверхности, поток тепла пройдет сквозь всю толщину образца за время $t=d^2/a=0,3\text{--}0,4$ с, что гораздо меньше времени стандартного процесса ИЛТ.

После того, как установится стационарный поток тепла, температура мишени будет зависеть от условий конкретного эксперимента. Наиболее благоприятный случай для отвода тепла от задней поверхности образца КРТ будет тогда, когда он с помощью высоко теплопроводящей пасты приклеивается к столику, принудительно охлаждаемому проточной водой, имеющей температуру 15–20 °С. Такая схема реализуется, например, в установке ионного травления “IM/Sid” фирмы SECON (Австрия) с источником Кауфмана. Тогда, для оценки распределения температуры $T(z)$ в объеме КРТ, мы можем воспользоваться одномерным стационарным уравнением теп-

лопроводности для плоской пластины, решение которого хорошо известно, и которое для случая подвода тепловой энергии с помощью ИЛТ запишем в виде:

$$T(z) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{d} z, \quad (3)$$

$$(\varepsilon_{\text{фон.}} + \varepsilon_{\text{ион.}})P = \frac{\chi}{d}(T_1 - T_2), \quad (4)$$

где T_1 – температура передней, бомбардируемой ионами, поверхности образца, T_2 – температура задней поверхности, которая принудительно охлаждается. Примем величины $T_2 = 20^\circ\text{C}$ и $d = 0,1$ см. Тогда для ИЛТ объемного $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ ионами Ag^+ с $E = 0,5$ кэВ и $j = 0,2$ mA/cm^2 из уравнения (4) получим, что $T_1 = 20,2^\circ\text{C}$. Таким образом, при принудительном охлаждении образца КРТ в процесс ИЛТ он практически не нагревается. Увеличение плотности тока и энергии ионов Ag^+ в несколько раз не приведут к заметному нагреву мишени.

Рассмотрим другой крайний случай, когда образец КРТ в процессе ИЛТ не соприкасается со столиком, то есть между задней поверхностью образца и столиком существует зазор (для снятия заряда под образец можно подложить тонкую металлическую проволоку). Тогда образец под действием пучка ионов начнет нагреваться до тех пор, пока подводимая мощность не сравняется с мощностью теплового излучения, испускаемого нагретым образцом, поскольку в вакууме других способов отвода тепла от образца не существует. Вакуумная камера находится при комнатной температуре, столик, который тоже нагревается под пучком ионов, охлаждается водой. Нагрев прекратится, когда подводимая ионным пучком мощность сравняется с потоком теплового излучения со всей поверхности.

Для определенности, будем считать, что образец имеет площадь $S = 1 \times 1$ cm^2 и толщину $d = 1$ мм, тогда полная площадь излучающей поверхности $S_{\text{изл.}} = 2,4$ cm^2 . Температура вакуумной камеры $T_0 = 295$ К (считаем ее абсолютно черным телом). Максимальную температуру (T_m) КРТ найдем из уравнения теплового баланса:

$$(\varepsilon_{\text{фон.}} + \varepsilon_{\text{ион.}})PS = a_T \sigma S_{\text{изл.}} (T_m^4 - T_0^4), \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, a_T – коэффициент серости, принятый равным 0,7, как у кремния. Из уравнения (5) для максимальной температуры КРТ получаем

$$T_m = \sqrt[4]{\frac{(\varepsilon_{\text{фон.}} + \varepsilon_{\text{ион.}})PS}{a_T \sigma S_{\text{изл.}}} + T_0^4}. \quad (6)$$

Для рассматриваемых режимов ИЛТ (Ag^+ , $E = 0,5$ кэВ, $j = 0,2$ mA/cm^2) величина $T_m = 75^\circ\text{C}$. Если увеличить плотность тока до 0,3 mA/cm^2 , то образец нагреется уже до 95°C .

Зависимость температуры мишени от времени нагрева найдем из дифференциального уравнения для баланса энергии, поступающей от пучка ионов на нагрев образца за время dt , энергии, расходуемой на рост температуры на величину dT , и излучаемой энергии за время dt :

$$(\varepsilon_{\text{фон.}} + \varepsilon_{\text{ион.}})PS \cdot dt = \rho_V S d C_p \cdot dT + a_T \sigma S_{\text{изл.}} (T^4 - T_0^4) \cdot dt. \quad (7)$$

Решение дифференциального уравнения (7) имеет следующий вид:

$$t(T) = \frac{\rho_V S d C_p}{2 a_T \sigma S_{\text{изл.}} T_m^3} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{(T_m + T)(T_m - T_0)}{(T_m - T)(T_m + T_0)} + \arctg \left(\frac{T}{T_m} \right) - \arctg \left(\frac{T_0}{T_m} \right) \right], \quad (8)$$

где T_m – максимальная температура, рассчитываемая согласно (6).

Зависимости температуры $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ от времени нагрева под пучком ионов Ag^+ с $E = 0,5$ кэВ и различными плотностями тока приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что нагрев образца до температуры, близкой к максимальной, в зависимости от подводимой мощности (плотности тока), происходит в течение 3–4 минут, что, как правило, меньше времени типичного процесса ИЛТ.

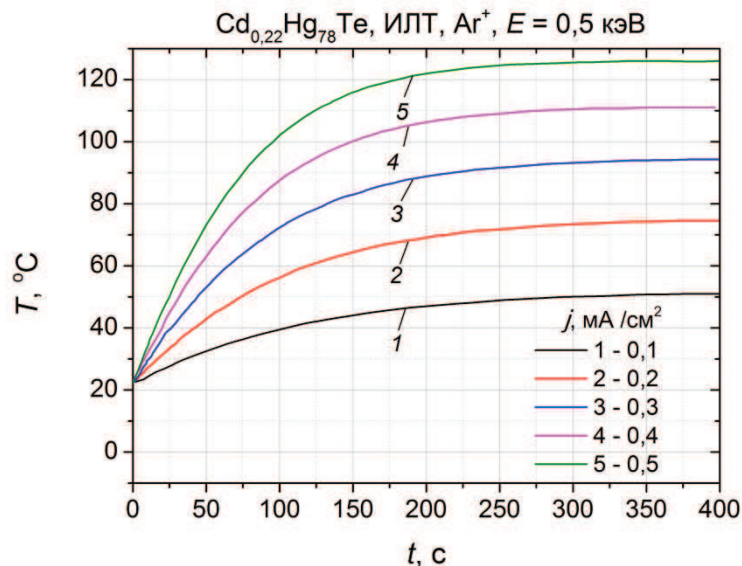


Рисунок 1. Рассчитанные согласно уравнению (8) зависимости температуры от времени нагрева

Литература

1. Талипов Н. Х., Войцеховский А. В., Григорьев Д. В. Влияние состава варизонного слоя на формирование n^+n^-p структур в имплантированных бором гетероэпитаксиальных слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 3. – С. 54–67.
2. Jevtic M. M., Scepanovic M. J. Melting and solidification in laser-irradiated HgCdTe , a numerical analysis / Appl. Phys. Lett. – 1991. – V. A53. – P. 332–338.
3. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Шульга С. А., Смит Р. Моделирование взаимодействия мощных импульсных пучков ионов с полупроводниковой мишенью кадмий-ртуть-теллур / Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 8. – С. 42–50.

C26 About heating of the $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ during ion milling

¹ Talipov N.Kh., ² Voitsekhovskii A.V.

¹ Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Force, Balashiha, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Ion milling is applied in technology of creation both photodiodes and photoresistors based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. As during ion bombing of the p -type $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ a formation of n^+n^-p structure take place in which n^- -layer depth significantly depends on temperature, determination of material temperature during ion milling is of interest. In present work results of calculations of $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ temperature at various processing conditions of ion milling are presented.

C27 Фотолюминесцентное исследование дефектной структуры слоев HgCdTe , выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках GaAs и Si

¹ Мынбаев К.Д., ¹ Баженов Н.Л., ¹ Тимошков А.О., ² Варавин В.С., ² Михайлов Н.Н.,
² Марин Д.В., ² Якушев М.В., ² Дворецкий С.А.

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) на протяжении последних 50 лет остаются одним из основных материалов для изготовления инфракрасных фотоприемников. Традиционно основное