



МИНИСТЕРСТВО
ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



KIPhO

МФТИ

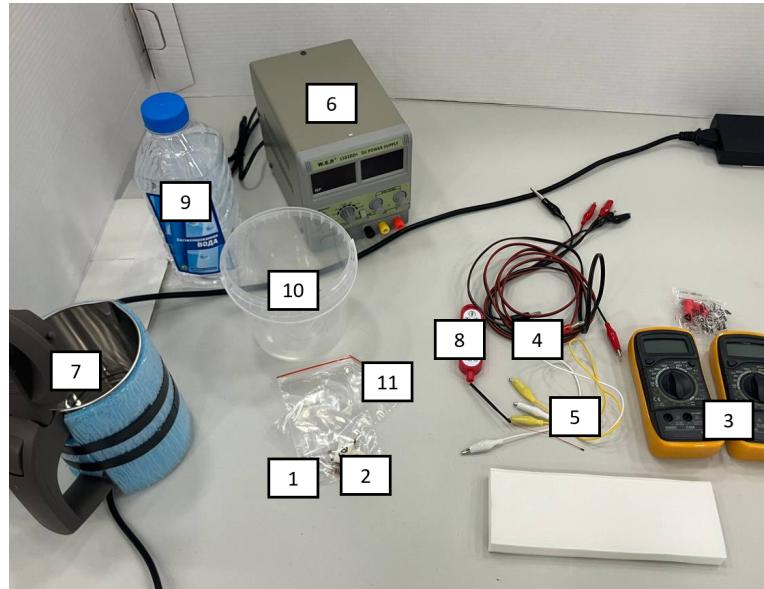
ГИМНАЗИЯ
им. Е. М. ПРИМАКОВА

ВКУСВИЛЛ

M2 Пробой в полупроводниках

Оборудование

1. Набор стабилитронов (5 штук)
2. Резистор 20 Ом
3. 2 мультиметра
4. 3 спаренных провода банан-крокодил
5. 2 провода крокодил-крокодил
6. Источник постоянного напряжения
7. Нагреваемый калориметр (чайник в теплоизоляции)
8. Термометр
9. Дистиллированная вода
10. Одно ведро
11. Зип-пакет
12. Ноутбук



Теоретическое введение

Стабилитрон - это полупроводниковый диод изготовленный таким образом, что при подключении в запирающем режиме может наблюдаться пробой. На ВАХ это выглядит как резкий рост силы тока при напряжениях по модулю больших, чем некоторое U_s . В таком режиме, если подключить НЕидеальный источник с некоторым значением ЭДС $\mathcal{E} > U_s$ к стабилитрону, то напряжение на нём все равно будет U_s . Это напряжение называют напряжением стабилизации. То есть, данный прибор можно использовать как стабилизатор напряжения. Рассмотрим особенности полупроводника на примере кремния. В кристаллической решётке чистого кремния все четыре электрона с внешней оболочки каждого атома находятся в связанным с атомом состояниями (валентные электроны). Обозначим их энергию за ноль. При этом, чтобы некоторый валентный электрон стал свободным (т.е. свободно распространяющимся в кремнии), его нужно «возбудить», чтобы его энергия стала больше E_G . При этом электроны НЕ МОГУТ иметь промежуточную энергию: либо ноль, либо $E_e = E_G + K$, где K - кинетическая энергия. Энергию E_G называют энергией запрещенной зоны. Энергия E_G оказывается гораздо больше, чем тепловая энергия $k_B T$ для комнатной температуры, поэтому в чистом кремниевом практические все электроны являются валентными, и он слабо проводит электрический ток. Полупроводники модифицируют с помощью примесей. Например, добавляя атомы фосфора в решётку кремния, мы создаем свободные электроны (количество валентных электронов остаётся тем же). В таком модифицированном полупроводнике носителями заряда являются электроны. Они обладают **отрицательным** зарядом, и поэтому такой полупроводник называют *n*-полупроводник (*negative*). Можно добавить в кремний атомы бора, которые забирают валентные электроны. Но на это можно посмотреть по-другому: будем считать, что количество валентных электронов осталось таким же, но на месте некоторых из них (где в реальности нет валентных электронов) находятся положительные заряды, которые назовем дырками. Дырки являются свободными носителями заряда и обладают **положительным** зарядом, и поэтому такой полупроводник называют *p*-полупроводник (*positive*). Полупроводниковый диод это такой кусок полупроводника, у которого две половины по-разному модифицированы, одна половина является *n*-полупроводником, вторая *p*-полупроводником. Все нетривиальные свойства полупроводникового диода (например, нелинейный ВАХ) определяются процессами в области перехода между *p*-областью и *n*-областью (*pn*-переходом).

ВНИМАНИЕ! Прямое подключение диода — это такое подключение, при котором ток течет из *p*-области в *n*-область. На стабилитроне *n*-область помечена черным кольцом. Во всей задаче исследуется **обратное подключение стабилитрона**, то есть подключение положительного полюса источника к стороне с черным кольцом.

Пробой в стабилитроне может проходить по трем механизмам:



МИНИСТЕРСТВО
ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



KIPhO

МФТИ

ГИМНАЗИЯ
им. Е. М. ПРИМАКОВА

ВКУСВИЛЛ

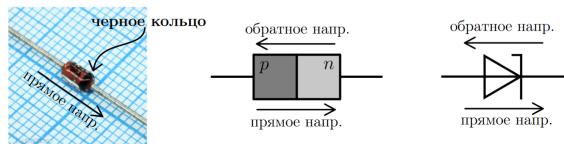


Рис. 1. Стабилитрон.

- **Лавинный механизм.** Возникает, если носители заряда в ходе движения по полупроводнику приобретают кинетическую энергию достаточную для образования новых электрон-дырочных пар. В таком случае количество носителей (и обусловленная ими проводимость) значительно возрастает.
- **Туннельный механизм.** Является следствием квантового эффекта туннелирования.
- **Тепловой механизм.** Связан с разрушением pn -перехода из-за сильного нагрева при протекании тока через него.

Лавинный и туннельный механизмы работают вместе. Соотношение между вкладом этих механизмов в характеристики пробоя конкретного стабилитрона зависит от его напряжения стабилизации.

Часть А. Лавинный пробой.

Подробно рассмотрим механизм лавинного пробоя. В области pn -перехода электрическое поле оказывается значительно больше, чем в оставшемся объеме. Практически все напряжение падает именно на pn -переходе, и носители заряда двигаются ускоренно. Действием всех сил, кроме взаимодействия с электрическим полем, будем пренебречь. Если какая-нибудь частица с кинетической энергией $K > E_G$ двигается внутри полупроводника, то она с некоторой вероятностью может «удариться» об атом и потратить свою кинетическую энергию на возбуждение валентного электрона. Тогда вместо валентного электрона у нас появится свободный электрон и дырка. Если в качестве такой частицы выступает электрон или дырка, то в результате «удара» вместо одного носителя заряда мы получим три носителя заряда.

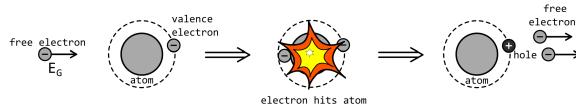


Рис. 2. Механизм лавинного пробоя.

A1 При движении по проводнику электрон регулярно «сталкивается» с атомами решетки. Среднее расстояние, которое он проходит между «столкновениями», называют длиной свободного пробега электрона λ . Найдите кинетическую энергию электрона K_e , которую он имеет перед столкновением с атомом, если после предыдущего столкновения его энергия была нулевой. Ответ выразите через напряженность электрического поля в среде E , элементарный заряд e . Запишите условие для напряженности поля E при котором электрон при каждом столкновении будет создавать новую электрон-дырочную пару.

Аналогичного механизма для дырок не существует, так как дырки являются эффективной, а не реальной частицей. Эффективную массу электрона, которую нужно использовать в уравнениях движения (например втором законе Ньютона), обозначим m_e^* .

A2 Используя результат пункта **A1**, выразите длину свободного пробега λ через элементарный заряд e , эффективную массу электрона m_e^* , U_s - напряжение стабилизации стабилитрона, d - ширину pn -перехода и энергию запрещенной зоны кремния E_G .



A3 В листах ответов нарисуйте качественный график ВАХ стабилитрона в обратном направлении при лавинном пробое.

Примечание. ВАХ - это зависимость I от U , а не наоборот!

Часть В. Туннельный пробой.

Теперь подробно рассмотрим механизм туннельного пробоя. Он является следствием квантовой природы частиц. Если классическая частица, при налетании на энергетический барьер, отражается от него, то квантовая частица имеет небольшой шанс пройти (туннелировать) через этот барьер.

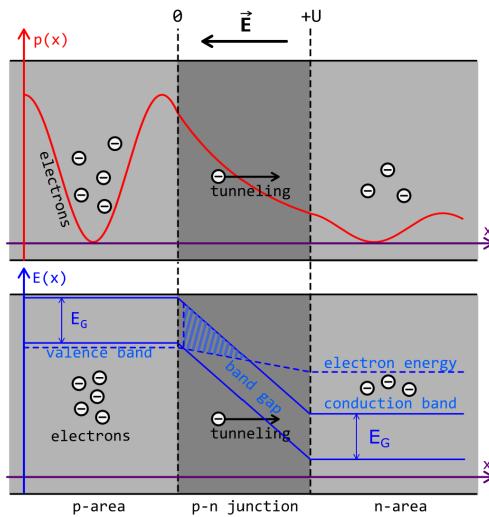


Рис. 3. Процесс туннелирования.

При увеличении напряжения на стабилитроне уровень энергии свободных электронов в p -полупроводнике (относительно n -полупроводника) повышается, и туннелирование происходит эффективнее. При нагревании изменяется эффективная масса электронов, и напряжение пробоя уменьшается.

Количество электронов Z , которые туннелируют через $p-n$ -переход в единицу времени:

$$Z = \frac{Ve^2E^2}{18\pi\hbar^2} \sqrt{\frac{m_r}{E_G}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi\sqrt{m_r}E_G^3}{2\hbar e E}\right)$$

где V - объем $p-n$ -перехода, E - напряженность электрического поля внутри $p-n$ -перехода, \hbar - приведённая постоянная Планка, E_G - энергия запрещённой зоны, $m_r = \sqrt{\frac{m_p^* m_n^*}{m_p^* + m_n^*}}$ - приведенная эффективная масса носителей заряда.

B1 Используя формулу, предложенную в условии, постройте характерный график ВАХ для $p-n$ -перехода при туннельном пробое. Примечание. ВАХ - это зависимость I от U , а не наоборот!

Часть С. Эксперимент.

Для проверки теоретических моделей предлагается исследовать 5 выданных стабилитронов при разных температурах. Обратите внимание, что стабилитроны имеют флагки с подписями $D1 - D5$.

Важное примечание!

- Во всех пунктах этой части задачи подразумевается исследование стабилитрона при **обратном подключении**.



МИНИСТЕРСТВО
ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ



KIPhO



ВКУСВИЛЛ

- Во всех пунктах этой части задачи положительное напряжение - это напряжение, при котором ток течет в обратном направлении, то есть из n -области в p -область. То есть положительное направление тока - обратное.
- Под напряжением стабилизации U_s подразумевается напряжение, при котором сила тока равна 60 мА, если явно не указано другое.
- **ЗАПРЕЩЕНО пропускать через стабилитрон ток сило больше 120 мА!!!**

На рисунке представлена схема для измерений. Выданный резистор номиналом 20 Ом обозначен r , стабилитрон обозначен D . Введем обозначения: U_0 и U_r – напряжение на вольтметре V_1 и V_2 соответственно. **Обратите внимание на полярность подключения.**

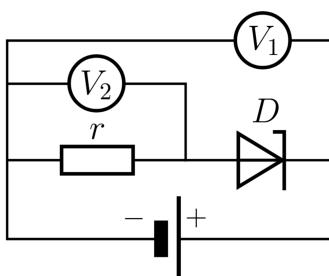


Рис. 4. Схема для измерений.

C1 Объясните, почему данная схема для измерений является оптимальной, и почему нельзя подключить **None** вольтметр V_1 напрямую к стабилитрону.

C2 Выразите силу тока I_D через стабилитрон и напряжение U_D на нем через U_0 , U_r , r . **None**

C3 Измерьте напряжения стабилизации U_s стабилитронов при комнатной температуре, запишите их в лист **None** ответов под номером соответствующего стабилитрона. **Примечание.** Как и любой элемент, стабилитрон нагревается при пропускании через него тока, поэтому измерения следует проводить при погруженном в воду стабилитроне.

Перейдем непосредственно к измерению вольт-амперной характеристики.

Указания по обработке данных.

Обработка и хранение данных будут производиться с помощью MS Excel. Все измеряемые величины вы можете сразу записывать в электронные таблицы. Для того, чтобы жюри могло корректно проверить вашу работу, называйте файлы и записывайте данные в таблицы **строго так, как указано в условии**.

На рабочем столе вашего компьютера есть папка с названием «M2». В ней находятся файлы «check.bat», «example.xlsx» и папка «First name Second Name». **Вам необходимо переименовать эту папку, чтобы она содержала ТОЛЬКО ваши фамилию и имя, иначе работа не будет проверена!**

После того как вы переименовали папку, откройте её. В ней содержатся подпапки с номерами пунктов и файл «Report.docx». **Не меняйте** названия подпапок и название файла «Report.docx».

В подпапке пункта необходимо в **ОТДЕЛЬНЫХ ФАЙЛАХ** сохранять все прямые измерения и дальнейшее решение. В файлах с решением должны содержаться комментарии к тому, какие величины вычисляются **В КАЖДОМ** столбце. Эти же комментарии **ДОЛЖНЫ** быть записаны в листы ответов к соответствующему пункту. Файлы решения должны быть названы «SolX.xlsx», где X – название решаемого пункта, и сохранены в папку этого пункта. Файлы решения, сохраненные в неправильных папках **проверяться не будут**. Таким образом, если вы решаете пункт **C4**, то вы должны создать файл «SolC4.xlsx» в папке «C4».



Файл «example.xlsx» - шаблон для записи измерений. **Все измеренные данные должны быть оформлены по этому шаблону. При неправильном оформлении файлы не будут оцениваться!** Файлы с измерениями должны быть названы «MesX.xlsx» и сохранены в папку этого пункта. В файлах с измерениями не должно содержаться ничего кроме исходных измерений: номер стабилитрона (только цифра), температура воды T в которую погружен стабилитрон, измерения U_0 и U_r . **Все файлы измерений которые будут оформлены не по шаблону или содержать какие-либо лишние данные не будут оценены!!!** Таким образом, если вы решаете пункт C4, то вы должны скопировать файл «example.xlsx» и переименовать его в «MesC4.xlsx» в папке «C4».

Ниже приведен пример заполненного файла измерений и корректно оформленного файла решения.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Diode #	1	Diode #	2	Diode #	1	Diode #	2	Diode #		Diode
2	$T, ^\circ\text{C}$	21	$T, ^\circ\text{C}$	24	$T, ^\circ\text{C}$	45	$T, ^\circ\text{C}$	86	$T, ^\circ\text{C}$		$T, ^\circ\text{C}$
3	U_0, V	U_0, V	U_0, V		U_0, V						
4	0.01	0.011	0.05	0.006	0.02	0.007	2.67	0.286			
5	0.03	0.135	1.10	0.131	1.20	0.144	4.00	0.434			
6	1.88	0.300	2.01	0.288	2.35	0.275	5.30	0.573			
7	2.78	0.409	3.14	0.425	3.45	0.430	6.67	0.725			
8	3.75	0.573	4.21	0.559	4.69	0.561	7.96	0.863			
9	4.68	0.722	5.13	0.695	5.84	0.727	9.27	0.991			
10	5.69	0.850	6.14	0.847	7.06	0.838	10.77	1.131			
11	6.50	0.989	7.05	1.01	8.01	0.996	12.00	1.256			
12	7.51	1.151	8.36	1.144	9.46	1.157	13.40	1.430			
13	8.55	1.274	9.29	1.267	10.52	1.291	14.62	1.566			
14	9.34	1.418	10.28	1.435	11.75	1.433	15.99	1.703			
15	10.35	1.575	11.32	1.566	12.94	1.575	17.43	1.860			
16	11.23	1.705			14.07	1.722	18.71	2.004			
17	12.32	1.862			15.37	1.843					
18	13.25	1.986									
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											

Рис. 5. Пример таблицы, заполненной исходными данными.

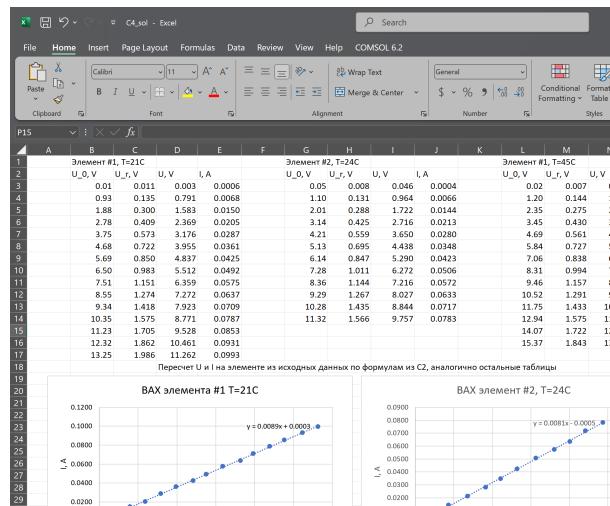


Рис. 6. Пример корректно оформленного решения.

Для проверки правильности сохранения исходных измерений вы можете запустить файл «check.bat». После исполнения этот файл должен выдать вам следующие строки в консоли:

Если файл выдает какие-либо ошибки, предусмотренные им, или какие-либо консольные ошибки, значит, не все файлы соответствуют требованиям оформления, и их необходимо исправить. Если файл не выдает какую-либо серию измерений, значит она также некорректно записана и сохранена!

Перейдём непосредственно к измерениям.

Порядок измерений.

- Не забудьте переименовать папку «First name Second Name» на свои фамилию и имя!
- Скопируйте шаблон (не переместите!) в папку пункта, который собираетесь измерять. Переименуйте его в «MesX.xlsx».



```
Error_1: Extra files in the root directory!
Error_2: File example copy.xlsx not in item directory!
Error_2: File example.xlsx not in item directory!
Error_2: File MesD5.xlsx not in item directory!
Error_2: File SolD5.xlsx not in item directory!
Error_5: Solution file B1_sol.xlsx is not correctly named!

Name: Name Surname

Found data files:
- MesB2.xlsx  File path: Name Surname/B2/MesB2.xlsx
  - Diode #1, T=21*C
  - Diode #2, T=24*C
  - Diode #1, T=45*C
  - Diode #2, T=86*C
- MesC4.xlsx  File path: Name Surname/C4/MesC4.xlsx
  - Diode #1, T=21*C
  - Diode #2, T=24*C
  - Diode #1, T=45*C
  - Diode #2, T=86*C
- MesD3.xlsx  File path: Name Surname/D3/MesD3.xlsx
  - Diode #1, T=0*C
  - Diode #1, T=12*C
  - Diode #1, T=24*C
  - Diode #1, T=40*C
  - Diode #1, T=52*C

Found solution files:
- SolB1.xlsx  File path: Name Surname/B1/SolB1.xlsx
- SolB2.xlsx  File path: Name Surname/B2/SolB2.xlsx
- SolC4.xlsx  File path: Name Surname/C4/SolC4.xlsx
- SolD3.xlsx  File path: Name Surname/D3/SolD3.xlsx
```

Рис. 7. Пример вывода в консоли.

- Не меняя **никаких** заполненных клеточек в файле «*MesX.xlsx*», а только заполняя пустые клеточки в соответствии с условием, снимите и занесите в файл необходимые измерения U_0 , U_r , T .
- Создайте файл «*SolX.xlsx*» и скопируйте в него необходимые данные, после чего проделайте с ними необходимый пересчет, оставляя комментарии к своим действиям **и в таблице, и в листах ответов!**
- Сохраните необходимые графики в файл «*Report.docx*» в ячейку, предусмотренную для вашего графика к этому пункту и стабилитрону.

C4 Снимите ВАХ всех выданных стабилитронов при комнатной температуре в диапазоне токов от 0 мА до 100 мА. ВАХи должны содержать не менее 15 точек, равномерно покрывающих весь диапазон токов. Постройте графики ВАХ и вставьте построенные графики в «*Report.docx*». Результатом этого пункта должен быть файл «*MesC4.xlsx*», содержащий исходные измерения (**и только их!**), файл «*SolC4.xlsx*», в котором будет произведен необходимый пересчет, комментарии к нему и построены графики ВАХ, а также изображения графиков сохраненные в «*Report.docx*».

Нетрудно заметить, что начиная с некоторого напряжения пробоя U_s , ВАХ диода меняет свой характерный вид. Это связано со сменой преобладающего механизма пробоя.

C5 Используя теоретическую часть, определите для каждого стабилитрона какой из механизмов пробоя для него преобладает. Оцените напряжение при смене механизма пробоя U_{s0} . Запишите полученные результаты в листы ответов.

Для начала исследуем туннельный пробой:

C6 С помощью формулы, предложенной в **части В**, линеаризуйте зависимость, полученную для диода с туннельным механизмом пробоя (т.е. с наименьшим напряжением открытия). Постройте линеаризованный график и вставьте его в «*Report.docx*». Используя константы из выданной таблицы, определите ширину pn -перехода d и запишите её в листы ответов. **Примечание:** Эффективные массы электрона и дырки даны при комнатной температуре и идеальных условиях, в реальности эти величины могут сильно отличаться от данных в таблице в конце условия. Результатом вашей работы по решению этого пункта должна быть таблица «*SolC6.xlsx*» и изображения графиков, перенесенные в «*Report.docx*».

К сожалению, как уже было сказано, эффективные массы дырки и электрона очень сильно зависят от многих факторов, в том числе от температуры. Зависимость от температуры возникает вследствие того, что концентрация носителей заряда меняется при изменении температуры, из-за чего электронный



газ внутри полупроводника ведет себя по-разному при разных температурах, что выражается в изменении эффективных масс. В следующих пунктах мы попробуем получить зависимость приведённой массы от температуры.

Для этого воспользуемся тем, что ВАХ туннельного стабилитрона зависит от температуры.

C7 При 4-х температурах, отличных от комнатной, снимите зависимость ВАХ стабилитрона, для которого вы выполняли пункт **C6**. Проделайте измерения в диапазоне токов от 0 мА до 100 мА. ВАХи должны содержать не менее 15 точек, равномерно покрывающих весь диапазон токов. Результатом Вашей работы по решению этого пункта должны быть файлы «MesC7.xlsx», «SolC7.xlsx» и графики ВАХ, перенесенные в «Report.docx».

C8 Линеаризуйте зависимости, полученные в предыдущем пункте, и получите приведенную массу для каждой температуры. Занесите её значения в таблицу в «Report.docx». Постройте график зависимости эффективной приведенной массы m_r от температуры и занесите его в «Report.docx». Все линеаризованные графики также должны быть перенесены в него. **Внимание!** Ширина pn -перехода d не зависит от температуры! Результатом вашей работы по решению этого пункта должен быть файл «SolC8.xlsx», графики ВАХ, перенесенные в «Report.docx» и заполненная таблица в «Report.docx».

Теперь рассмотрим лавинные стабилитроны.

Примечание. Во всех последующих пунктах задачи вместо напряжения стабилизации будем исследовать напряжение пробоя U_B - напряжение, соответствующее точке излома на графике ВАХ.

C9 Для лавинного стабилитрона с наибольшим напряжением пробоя U_s найдите длину свободного пробега λ . Используйте пункт **A2**, константы в таблице и значение ширины pn -перехода d , которое вы получили в пункте **C6**. Если вы не сделали пункт **C6**, то здесь и далее примите $d = 10$ нм. Результатом этого пункта должно быть решение в листе ответов.

Для туннельных стабилитронов напряжение лавинного пробоя тоже зависит от температуры. Используя этот факт, мы можем найти зависимость длины свободного пробега электрона λ в полупроводнике от температуры.

C10 Используя тот же стабилитрон, для 8-ми других температур (помимо уже промерянной комнатной) снимите ВАХ стабилитрона **в окрестности излома**. Каждый ВАХ должен содержать не менее 5 точек, и они обязательно должны лежать в окрестности точки излома. Результатом вашей работы по решению этого пункта должны быть файлы «MesC10.xlsx», «SolC10.xlsx» и графики ВАХ, перенесенные в «Report.docx».

C11 Для каждой температуры найдите напряжения пробоя U_B и занесите их в таблицу в «Report.docx» (включая напряжение пробоя при комнатной температуре). Найдите длину свободного пробега λ электрона и занесите её в ту же таблицу. Постройте график зависимости длины свободного пробега от температуры и также занесите его в «Report.docx». Результатом Вашей работы по решению этого пункта должен быть файл «SolC11.xlsx», графики ВАХ, перенесенные в «Report.docx» и заполненная таблица в «Report.docx».

Таблица констант.

Константа	Значение
\hbar	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с $6,582 \cdot 10^{-16}$ эВ · с
m_e	$9,109 \cdot 10^{-31}$ кг
e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
E_G	1,12 эВ
m_p^*	$0.56 \cdot m_e$
m_n^*	$1,06 \cdot m_e$