

УДК 535:621.373.826:539

СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ЯМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРАХ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА С СУБГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

© Н. Н. Рубцова¹, Г. М. Борисов¹, А. А. Ковалев¹, Д. В. Ледовских¹,
В. В. Преображенский¹, М. А. Путьято¹, Б. Р. Семягин¹,
С. А. Кузнецов², В. С. Пивцов²

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Институт лазерной физики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б
E-mail: rubtsova@isp.nsc.ru

Представлен обзор технологии дизайна и изготовления, методов и результатов исследования оптических спектров и кинетики отражения связанных квантовых ям A_3B_5 , а также результаты применения разработанных на их основе оптических затворов для синхронизации мод фемтосекундного лазера $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$ с высокой (порядка 1 ГГц) частотой следования импульсов.

Ключевые слова: квантовые ямы, зеркала для пассивной синхронизации мод лазеров.

DOI: 10.15372/AUT20200511

Введение. Первая публикация о применении полупроводниковых наноструктур SESAM (SEmiconductor Saturable Absorbtion Mirror) для получения устойчивого режима синхронизации мод лазеров показала эффективность их использования в фемто- и пикосекундных лазерах [1]. В ближнем ИК-диапазоне разработки прецизионных оптических систем на основе фемтосекундных лазеров особенно актуальны [2–4]. Такие системы востребованы в фундаментальных и прикладных исследованиях [5], в высокоточных координатно-временных измерениях объектов наземного и космического базирования [6], в метрологическом обеспечении высокотехнологичных отраслей промышленности и т. д. [7, 8]. Высокоэффективные иттербиевые лазеры, работающие в ближнем ИК-диапазоне, перспективны для этих систем. Устойчивый фемтосекундный режим в них возможен с использованием полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением (SESAM). Существующие в настоящее время коммерческие зеркала не всегда удовлетворяют всем требованиям указанной задачи. В связи с этим необходим поиск научно-технологических решений, позволяющих получать заданные оптические и динамические характеристики лазерных зеркал для синхронизации мод компактных лазеров ближнего ИК-диапазона. Конечная цель таких исследований — разработка оптических затворов, способных обеспечить высокое быстродействие, низкий уровень насыщающей интенсивности, стойкость относительно интенсивного рабочего излучения, а также малые ненасыщаемые потери. Решение этой задачи открывает перспективы создания компактных фемтосекундных иттербиевых лазеров и синтезаторов частот на их основе для навигационных систем, включая ГЛОНАСС.

Цель предлагаемой работы — поиск технологии создания оптических затворов для синхронизации мод фемтосекундного лазера $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$ с высокой (порядка 1 ГГц) частотой следования импульсов.

Дизайн, изготовление и исследование спектров и кинетики отражения затворов. Вышеперечисленные требования к оптическим затворам могут быть выполнены при их высоком кристаллическом качестве. Все представленные далее образцы выращены в Лаборатории физических основ эпитаксии полупроводниковых гетероструктур Института физики полупроводников (ИФП) им. А. В. Ржанова СО РАН в установках молекулярно-пучковой эпитаксии из высокочистых веществ (класса не ниже 6N5) на подложках типа *epi-ready* при контроле кристалличности по картине дифракции быстрых электронов на отражение. Высокая кристалличность структур гарантирует заметный вклад в спектры поглощения экситонов, локализованных в квантовых ямах. Это, в свою очередь, обеспечивает низкий уровень насыщающей интенсивности рабочего излучения («лёгкий старт» синхронизации мод).

Особенностью наноразмерных гетероструктур A_3B_5 является хорошо известная всем пользователям SESAM латеральная неоднородность, связанная с технологией выращивания [9]. Такая особенность роста может рассматриваться как недостаток лишь при необходимости получения большого количества одинаковых образцов. Для научных целей это, скорее, достоинство, позволяющее получить в одном ростовом цикле набор образцов с плавно изменяющимися параметрами от центра подложки к периферии; в частности, это относится к положению «стола» отражения SESAM [9]. В связи с указанной неоднородностью исследование линейных спектров отражения структур невозможно с помощью стандартных спектрометров. В лаборатории Лазерной спектроскопии и лазерных технологий ИФП СО РАН разработан метод регистрации спектров отражения полупроводниковых наноструктур с точностью $\sim 10^{-3}$ и с пространственным разрешением не хуже 1 мм (диаметр подложки обычно 50 мм). Для регистрации кинетики отражения слоя связанных квантовых ям, выращенных на полупроводниковом отражателе, разработана система типа «накачка — зондирование» на базе фемтосекундного лазера FL-1000. Система обеспечивает работу в диапазоне задержек пробного импульса относительно возбуждающего импульса 0–40 пс с временным разрешением 65 фс в области интенсивностей накачки до 5 ГВт/см² и с точностью регистрации относительного изменения отражения $5 \cdot 10^{-6}$ [10, 11].

Переход от изолированных квантовых ям к связанным квантовым ямам. Расчёты и эксперименты показали, что при переходе от изолированных квантовых ям A_3B_5 , разделённых толстыми барьерами, к набору связанных квантовых ям с тонкими барьерами, облегчающими туннелирование носителей заряда между ними, наблюдается уширение спектров поглощения, а также увеличение быстродействия оптических затворов на их основе. Так, изолированные квантовые ямы из InGaAs, окружённые толстыми барьерами из GaAs, демонстрируют время релаксации в диапазоне 100–900 пс [12]. Это время соответствует наиболее медленному процессу кинетики насыщенного поглощения квантовых ям — рекомбинации электронов и дырок ($e-h$ -рекомбинации). Разброс измеряемого времени $e-h$ -рекомбинации объясняется латеральной неоднородностью как самих квантовых ям, так и шероховатостей гетерограниц. Укорочение времени $e-h$ -рекомбинации является ключевой задачей для разработки оптических затворов, предназначенных для синхронизации мод лазера с коротким резонатором — затвор должен быть готов к следующему циклу синхронизации за время, меньшее времени обхода резонатора рабочим излучением. Известен ряд подходов к решению этой проблемы. В [13] применялась обработка готовых SESAM тяжёлыми ионами, что приводило к формированию точечных дефектов и к ускорению процесса $e-h$ -рекомбинации. Второй вариант ускорения рекомбинации электронов и дырок предусматривал введение чужеродных атомов в структуру в процессе её эпитаксиального роста [14], что приводило примерно к тому же результату. Более мягкий подход был апробирован в [12]. В результате облучения поверхности SESAM импульсами лазерного УФ-излучения наблюдалось уменьшение сигналов люминесценции от квантовых ям и укорочение времени $e-h$ -рекомбинации почти в 100 раз [12];

вклад экситонной компоненты в спектры фотолюминесценции образцов уменьшался по мере роста дозы УФ-облучения. Вышеперечисленные подходы связаны с формированием точечных дефектов, являющихся центрами $e-h$ -рекомбинации. Очевидно, что при этом идеальная кристаллическая структура образцов нарушается, а это означает уменьшение вклада экситонной компоненты в кинетику насыщения поглощения. Для применения в лазерах желательнее сохранить именно легко насыщаемый экситонный вклад, т. е. обеспечить «лёгкий старт» режима синхронизации мод. Ещё одно соображение против методов, приводящих к генерации точечных дефектов, заключается в том, что неочевидно, как именно поведут себя точечные дефекты под действием высокой интенсивности рабочего излучения и к каким последствиям для целостности структуры это приведёт. Нами были найдены подходы, неповреждающие кристаллическую решётку. Разработан метод наноструктурирования барьеров, позволивший получить время $e-h$ -рекомбинации почти в 100 раз меньше, чем для одиночных квантовых ям с толстыми барьерами. Суть метода заключается в прослаивании толстого барьера вставками более узкозонного материала при сохранении гладкости гетерограниц, что должно способствовать туннелированию носителей заряда между соседними квантовыми ямами и вследствие этого к сокращению времени восстановления оптического затвора к следующему циклу синхронизации мод лазера, определяемому процессом $e-h$ -рекомбинации. Экспериментально получено время релаксации 7,8 пс [10]. Такой оптический затвор был успешно применён для синхронизации мод лазера Yb:KYW. Получена длительность импульсов 115 фс при частоте следования 70 МГц; также подтверждено высокое оптическое качество разработанных затворов.

Следующий шаг состоял в переходе к конструкции затворов на основе квантовых ям, разделённых тонкими барьерами [9], т. е. к разработке SESAM со связанными квантовыми ямами. Отражатель SESAM представлен 24–29 парами четвертьволновых слоёв GaAs и AlAs; квантовые ямы выполнены из $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ толщиной 15,5 нм, барьеры — из GaAs толщиной 2,8 нм. На рис. 1 показаны кинетические кривые отражения для трёх интенсивностей импульса накачки.

На рис. 1 видно, как усложняется вид кинетических кривых в области высоких интенсивностей накачки. В этом пределе для моделирования кривой необходимо учитывать не только время ионизации экситонов τ_1 и время $e-h$ -рекомбинации τ_2 , но и время установления квазиравновесия электронно-дырочных пар τ_3 (этот процесс проявляется в виде до-

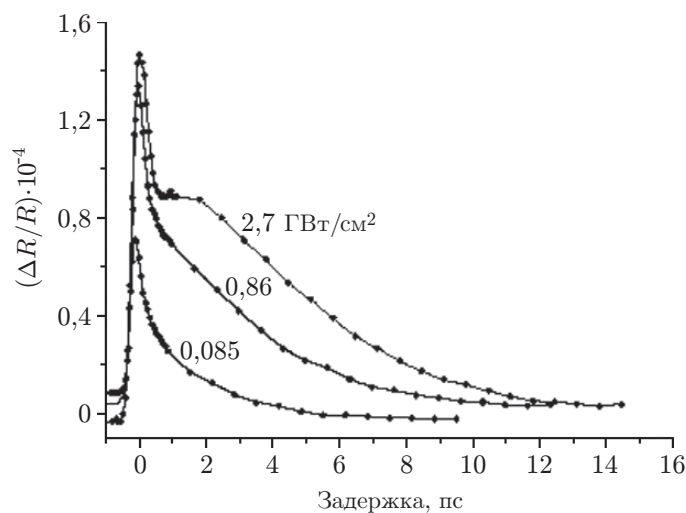


Рис. 1. Кинетика отражения SESAM из связанных квантовых ям с полупроводниковым отражателем при разных интенсивностях накачки

полнительного плеча при высоких интенсивностях накачки). Важно отметить, что время релаксации τ_2 (в нашем случае 2–5 пс) практически не зависит от интенсивности накачки, что гарантирует сохранение быстродействия затвора в широкой области интенсивностей рабочего излучения.

Совершенствование отражателя. Высококачественный отражатель является обязательным условием создания SESAM. Полупроводниковые материалы в ИК-области имеют высокую дисперсию коэффициента преломления, что ограничивает полосу отражения зеркала (в случае пары GaAs/AlAs это ~ 100 нм [9, 15]). Рабочая среда — лазерный кристалл $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ имеет широкую полосу усиления, и для реализации потенциала активной среды необходим более широкополосный отражатель оптического затвора. Применение диэлектрического отражателя позволяет расширить его спектральную полосу, по крайней мере, вдвое [9, 15]; при этом слой связанных квантовых ям переносится на диэлектрическое зеркало. Кроме того, отражатель из окислов кремния и циркония существенно дешевле отражателя, выращенного из сверхчистых полупроводниковых веществ методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Зеркала с диэлектрическим отражателем (DSAM) изготавливались на основе полупроводниковой структуры, содержащей между подложкой и квантовыми ямами слой $\text{In}_{0,48}\text{Ga}_{0,52}\text{P}$. Этот материал обладает высокой избирательностью травления в определённых средах по отношению к материалу подложки GaAs. Это позволяет химически удалять подложку, не повреждая квантовые ямы. После роста квантовых ям на поверхности такой структуры на тонкий защитный слой GaAs наносился слой кремния. После его окисления на атмосфере на поверхность SiO_2 методом электронно-термического напыления наносились несколько четвертьволновых слоёв (не более 9) окислов ZrO_2 и SiO_2 для формирования диэлектрического зеркала. Затем структура со стороны зеркала соединялась с носителем (сапфир, медь) и удалялась подложка. Измерения [9, 15] показали, что быстродействие DSAM (2 пс) не слишком отличается от времени релаксации монолитного затвора SESAM (2–5 пс). Различие между SESAM и DSAM обнаружилось при их испытаниях в резонаторе лазера.

Применение SESAM и DSAM в компактном лазере. Полностью полупроводниковый затвор SESAM и затвор с диэлектрическим отражателем DSAM были доработаны до необходимого уровня насыщаемого поглощения [9] и испытаны в лазере $\text{Yb}:\text{KYW}$. Лазерный кристалл в [9] накачивался излучением диодного лазера DBR TDL на длине волны 981 нм (производитель Ferdinand-Braun-Institut, Германия) с максимальной мощностью 5 Вт. Для компенсации дисперсии групповых задержек использована пара интерферометров Жира — Турнуа. Применялись различные мощности оптической накачки и разные конфигурации лазерного резонатора. Все экспериментальные результаты [9] получены при комнатной температуре без охлаждения лазерного кристалла и без стабилизации температуры оптических затворов.

Оптическое качество затворов иллюстрирует рис. 2, представляющий зависимости средней выходной мощности лазера в режиме синхронизации мод от мощности накачки, поглощённой лазерным кристаллом $\text{Yb}:\text{KYW}$. Для сравнения использован коммерческий образец SESAM 1040-1,5-1ps фирмы Bator (Германия).

Обозначения на рис. 2 соответствуют трём видам затворов: коммерческому SESAM 1040-1,5-1ps (Bator) и разработанным нами SESAM и DSAM. Прямые линии представляют линейные аппроксимации зависимостей. Судя по рис. 2, SESAM превосходит коммерческий по эффективности генерации. Эффективность генерации по отношению к мощности накачки, поглощённой лазерным кристаллом, составила: 60 % для SESAM, 31 % для коммерческого затвора и 23 % для DSAM. Максимальная частота следования фемтосекундных импульсов достигала 0,98 ГГц [9]. Оценка длительности импульсов ~ 200 фс получена по ширине спектра излучения. Для полностью полупроводникового затвора SESAM оценён

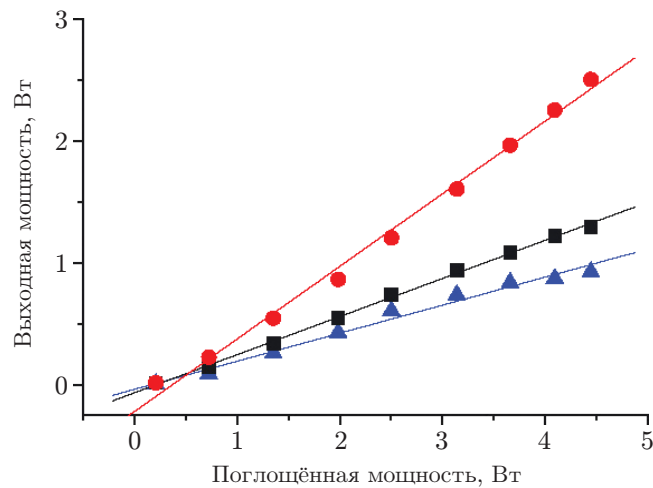


Рис. 2. Эффективность генерации по отношению к мощности накачки, поглощённой кристаллом Yb:KYW, для трёх оптических затворов: квадраты — коммерческий SESAM 1040-1,5-1ps (Batop); круги — SESAM; треугольники — DSAM

порог разрушения рабочим излучением не менее $8,87 \text{ мДж/см}^2$, что почти вдвое выше значения, указанного в паспорте коммерческого затвора.

Обсуждение. Полученные в [9] результаты сопоставимы с известными литературными данными. Так, в [16, 17] в иттербиевом лазере удалось получить параметры лазерного излучения, близкие к значениям [9]. В [16] при использовании коммерческого SESAM частота следования импульсов составила 1 ГГц при длительности 278 фс, а в [17] с помощью затвора на основе углеродных нанотрубок получена частота следования 1,2 ГГц при длительности импульсов 169 фс. Для других твердотельных лазеров с диодной накачкой имеются данные о частотах следования в десятки и даже сотни ГГц иногда при более длинных импульсах излучения (смотри работу [18] и ссылки в ней). Возможность получения коротких импульсов излучения с высокой частотой следования определяется не только качеством оптического затвора, но и качеством компенсации дисперсии временных задержек, возникающих главным образом благодаря свойствам активной среды; известно также, что сверхкороткие импульсы излучения могут быть получены даже с относительно медленным затвором [19]. Отметим применение SESAM для генерации суперконтинуума [20] и солитонных пикосекундных импульсов с гигагерцовой частотой следования [21] в волоконных лазерах.

При конструировании полупроводниковых оптических затворов, кроме разработки собственно насыщающегося поглотителя (в нашем случае квантовые ямы), необходимо использовать широкополосный высококачественный отражатель, решить вопросы адгезии между столь разнородными материалами (полупроводники группы A_3B_5 и диэлектрические материалы отражателя), а также проблему отвода тепла. В работах [22, 23] можно найти некоторые сведения о решении этих проблем путём металлизации, нанесения окислов кремния и т. п. В данной работе специфика применения оптических затворов для лазеров с коротким резонатором делает эти проблемы более значимыми, особенно для высоких интенсивностей накачки. Отметим, что при изготовлении DSAM необходимо было выполнить перенос слоя квантовых ям из $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$. Этот материал не согласован с материалом барьеров; его параметр решётки на 1,79 % больше, чем в GaAs. К каким последствиям приводит внутреннее механическое напряжение материала квантовой ямы при переносе на диэлектрик? Пока можно судить об этом лишь косвенно: по более низкой

эффективности DSAM по сравнению с SESAM, а также по тому факту, что время релаксации для DSAM (2 пс) несколько меньше, чем для SESAM (от 2 до 5 пс). В перспективе планируется переход к другим веществам группы A_3B_5 — к четырёхкомпонентному полупроводниковому сплаву, согласованному по параметру решётки с материалом барьеров.

Заключение. По результатам исследования оптических затворов SESAM в лазере $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$ можно сделать выводы о высоком оптическом качестве полностью полупроводникового затвора, выполненного в едином цикле роста. Однако и DSAM при всём несовершенстве современной технологии показал неплохие результаты. В перспективе усилия будут направлены именно на этот более дешёвый вариант оптического затвора.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-29-20007, № 19-02-00242), Российского фонда фундаментальных исследований и Субъекта РФ (грант № 18-42-543001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller U., Weingarten K. J., Kärtner F. X. et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // IEEE Journ. Selected Topics in Quant. Electron. (JSTQE). 1996. **2**. P. 435–453.
2. Diddams S. A., Jones D. J., Ye J. et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb // Phys. Rev. Lett. 2000. **84**. P. 5102.
3. Udem Th., Holzwarth R., Haensch T. W. Optical frequency metrology // Nature. 2002. **416**. P. 233–237.
4. Bagayev S. N., Denisov V. I., Klementyev V. M. et al. Femtosecond combs for precision metrology // Laser Phys. 2004. **14**, N 11. P. 1367–1374.
5. Steinmetz T., Wilken T., Araujo-Hauck C. et al. Laser frequency combs for astronomical observations // Science. 2008. **321**, Iss. 5894. P. 1335–1337.
6. Кузнецов С. А., Пивцов В. С. Высокоэффективный компактный $Yb:KYW$ -лазер для прецизионных мобильных систем // Квантовая электроника. 2014. **44**, № 5. С. 444–447.
7. Schibli T. R., Minoshima K., Hong F. L. et al. Frequency metrology with a turnkey allfiber system // Opt. Lett. 2004. **29**, N 21. P. 2467–2469.
8. Li C., Benedick A., Fendel P. et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ // Nature. 2008. **452**. P. 610–612.
9. Rubtsova N. N., Kovalyov A. A., Ledovskikh D. V. et al. Optical shutters for a compact femtosecond $Yb:KYW$ laser // Laser Phys. 2020. **30**. P. 025001.
10. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалёв А. А. и др. Фемтосекундная кинетика отражения зеркал с насыщающимся поглощением // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 52–56. DOI: 10.15372/AUT20160206.
11. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалёв А. А. и др. Техника регистрации субпикосекундной кинетики отражения или пропускания // Приборы и техника эксперимента. 2018. **1**. С. 87–91.
12. Rubtsova N. N., Kuleshov N. V., Kisel' V. E. et al. Semiconductor nanostructures modified by UV laser radiation // Laser Phys. 2010. **20**. P. 1262–1265.
13. Mangeney J., Oudar J. L., Harmand J. C. et al. Ultrafast saturable absorption at 1.55 μm in heavy-ion-irradiated quantum-well vertical cavity // Appl. Phys. Lett. 2000. **76**. P. 1371–1373.
14. Okuno T., Masumoto Ya. Femtosecond response time in berillium-doped low-temperature grown GaAs/AlGaAs multiple quantum wells // Appl. Phys. Lett. 2001. **79**. P. 764–766.

15. **Рубцова Н. Н., Борисов Г. М., Гольдорт В. Г. и др.** Широкополосные с малым временем релаксации полупроводниковые зеркала для пассивной синхронизации мод лазеров ближнего ИК-диапазона // *Автометрия*. 2019. **55**, № 5. С. 20–23. DOI: 15.15372/AUT20190503.
16. **Schratwieser Th. C., Leburn Ch. G., Reid D. T.** Highly efficient 1 GHz repetition-frequency femtosecond Yb³⁺:KY(WO₄)₂ laser // *Opt. Lett.* 2012. **37**. P. 1133–1135.
17. **Yang H.-W., Kim Ch., Choi S. Y. et al.** 1.2-GHz repetition rate, diode-pumped femtosecond Yb:KYW laser mode-locked by a CNT saturable absorber // *Opt. Express*. 2012. **20**. P. 29518–29523.
18. **Pekarek S., Klenner A., Südmeyer T. et al.** Femtosecond diode-pumped solid-state laser with a repetition rate of 4.8 GHz // *Opt. Express*. 2012. **4**. P. 4248–4253.
19. **Kärtner F. X., Keller U.** Stabilization of solitonlike pulses with a slow saturable absorber // *Opt. Lett.* 1995. **20**. P. 16–18.
20. **Schweyer S. M., Eder B., Putzer P. et al.** All-in-fiber SESAM based comb oscillator with an intra-cavity electro-optic modulator for coherent high bandwidth stabilization // *Opt. Express*. 2018. **26**. P. 23798–23807.
21. **Zhou Y., Lin W., Cheng H. et al.** Composite filtering effect in a SESAM modelocked fiber laser with a 3.2-GHz fundamental repetition rate: switchable states from single soliton to pulse bunch // *Opt. Express*. 2018. **26**. P. 10842–10857.
22. **Zhang Zh., Nakagawa T., Takada H. et al.** Low-loss broadband semiconductor saturable absorber mirror for mode-locked Ti:sapphire lasers // *Opt. Commun.* 2000. **176**. P. 171–175.
23. **Sun J., Zhang R., Wang Q. et al.** High-average-power self-starting mode-locked Ti:sapphire laser with a broadband semiconductor saturable-absorber mirror // *Appl. Opt.* 2001. **40**. P. 3539–3541.

Поступила в редакцию 01.06.2020

После доработки 22.06.2020

Принята к публикации 22.06.2020
